

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки

Кафедра електронних приладів та пристроїв

«На правах рукопису»
УДК 577.2.08

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Л. Д. Писаренко

«__»_____ 2019 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 171 Електроніка

на тему: «Біосенсори на поверхневому плазмовому резонансі»

Виконав:

Студент II курсу, групи ДЕ-81мп **Бойко Юрій Олександрович** _____

Керівник:

Доцент кафедри ЕП та П, к.т.н. **Цибульский Л.Ю.**

Консультант:

Доцент кафедри ЕП та П, к.т.н. **Чадюк В.О.**

Рецензент:

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2019 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроніки
Кафедра електронних приладів та пристроїв

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 171 Електроніка (Електроні прилади та пристрої)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Л.Д. Писаренко

«___» _____ 2019 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Бойко Юрію Олександровичу

1. Тема дисертації «Біосенсори на поверхневому плазмовому резонансі», науковий керівник дисертації **Цибульський Леонід Юрійович, доцент, к.н.т.,** затверджені наказом по університету від «07» листопада 2019 р. № 3859-с

2. Термін подання студентом дисертації : «18» грудня 2019 р.

3. Об'єкт дослідження: ППР-сенсори, придатних для широкого використання в біології, медицині, сільському господарстві, тощо, в тому числі і в польових умовах.

4. Вихідні дані: Розробити біосенсор на основі поверхневого плазмонного резонансу з наступними параметрами: вимірювання показника заломлювання в межах від 1 до 1,8; довжина хвилі лазерного випромінювання для збудження поверхневих плазмонів – 650 нм; можливість введення інформації на ПК.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: огляд науково-технічної літератури по поверхневому плазмонному резонансі, розробка структурної схеми та розрахунки товщини металевої плівки та оптичної схеми; конструкторсько-технологічна частина, що містить розробку друкованої плати лазерного драйвера та друкованої плати системи керування процесом вимірювання; техніко-економічне обґрунтування приладу; охорона праці при проектуванні приладу з джерелом лазерного випромінювання.

6.Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

Структурна схема датчика, принципова електрична схема вимірювального модуля та креслення друкованої плати вимірювального модуля; плакати з формулами та графіками; оптична схема датчика.

7. Орієнтовний перелік публікацій:

Датчик на основі поверхневих плазмонних хвиль.

Керівник: к.т.н., доц. Чадюк В.О.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
	Чадюк В.О. доцент, к.т.н.		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд науково-технічної літератури по біосенсорі на поверхневому плазмовому резонансі	31.09.2019	
2	Теоретична частина, що містить фізико-математичне моделювання явища поверхневого плазмонного резонансу	20.10.2019	
3	Конструкторсько-технологічна частина: -розробка конструкції біосенсора; -розробка друкованої плати лазерного драйвера; -розробка оптичної схеми біосенсора;	10.11.2019	
4	Техніко-економічне обґрунтування розробки біосенсора на поверхневому плазмовому резонансі	15.11.2019	
5	Розробка заходів з охорони праці при розробці та експлуатації біосенсора з джерелом лазерного випромінювання	25.11.2019	
6	Оформлення пояснювальної записки, креслення, плакатів з формулами та результатами розрахунків, підготовка доповіді	10.12.2019	

Студент

Бойко Ю.О.

Науковий керівник дисертації

Цибульський Л.Ю.

Р Е Ф Е Р А Т

«Біосенсиори на поверхневому плазмовому резонансі / Магістерська дисертація напряму підготовки **171 Електроніка** спеціалізації **«Електронні прилади та пристрої»**. **Бойко Юрій Олександрович**. «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Факультет електроніки, кафедра електронних приладів та пристроїв. Група ДЕ-81мп. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2019. – 65 с., іл. 31, табл. 3.

Ключові слова: ППР – поверхневий плазмонний резонанс; ППХ – поверхневі плазмонні хвилі; ЛВ – лазерне випромінювання; ГЧ – геометрія Кретчмана.

Короткий зміст роботи: В магістерській дисертації представлено огляд науково-технічної літератури по використанню явища поверхневого плазмонного резонансу та основним методам генерації поверхневих плазмонних коливань. Показано перспективи використання цього методу в різноманітних застосуваннях вимірювальної техніки.

Приведено результати дослідження фізики процесу генерації та існування поверхневих плазмонних коливань на межі поділу між тонкою золотою плівкою, яка нанесена на скляну призму, та діелектриком. Розраховано режими роботи та характеристики потрібних компонентів для побудови вимірювального приладу, принцип дії якого базується на явищі поверхневого плазмонного резонансу.

Біосенсиори, відносно якого проводилося дослідження, мають такі характеристики:

- можливість вимірювання характеристик середовища без прямого контакту з ним;
- можливість дослідження перебігу різних процесів поблизу поверхні тонкого шару металу без втручання в сам процес та без використання різних реагентів;
- висока точність вимірювання діелектричної сталої середовища.

АНОТАЦІЯ

В магістерській дисертації представлено огляд науково-технічної літератури по використанню явища поверхневого плазмонного резонансу та основним методам генерації поверхневих плазмонних коливань. Показано перспективи використання цього методу в різноманітних застосуваннях вимірювальної техніки.

Приведено результати дослідження фізики процесу генерації та існування поверхневих плазмонних коливань на межі поділу між тонкою золотою плівкою, яка нанесена на скляну призму, та діелектриком. Розраховано режими роботи та характеристики потрібних компонентів для побудови вимірювального приладу, принцип дії якого базується на явищі поверхневого плазмонного резонансу.

Біосенсиори, відносно якого проводилося дослідження, мають такі характеристики:

- можливість вимірювання характеристик середовища без прямого контакту з ним;
- можливість дослідження перебігу різних процесів поблизу поверхні тонкого шару металу без втручання в сам процес та без використання різних реагентів;
- висока точність вимірювання діелектричної сталої середовища.

S U M M A R Y

In the master's thesis is an overview of scientific and technical literature on the use of the phenomenon of surface plasmon resonance and the main methods of generation of surface plasmon oscillations. Displaying prospects of using this method in various applications of measuring instruments.

The results of the study of physics of the process of generation and existence of surface plasmon oscillations at the interface between a thin gold film is deposited on a glass prism and dielectric. Calculated modes and characteristics of the components needed to build a measuring device, the principle of which is based on the phenomenon of surface plasmon resonance.

Biosensors, against which the survey have the following characteristics:

- The possibility of measuring the environment without direct contact with it;
- Possibility to study the course of various processes near the surface of a thin layer of metal without interference in the process and without the use of different reagents;
- High accuracy measurements of the dielectric constant of the medium.

З М І С Т

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	9
В С Т У П.....	10
1. ОГЛЯД НАУКОВО ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ПО ПЛАЗМОННИМ КОЛИВАННЯМ	12
1.1. Поверхневий плазмонний резонанс.....	12
1.2. Плазмонні коливання	14
1.3. Плазмони на плоскій межі поділу «метал-діелектрик».....	18
1.4. Збудження поверхневих плазмонів на плоскій межі поділу середовищ.....	23
1.5. Використання явища поверхневого плазмонного резонансу	25
1.5.1. Послідовність виконання якісного аналізу.....	27
1.5.2. Кількісний аналіз.....	29
1.5.3. Аналіз якості харчових продуктів та їх безпеки	31
1.5.4. Моніторинг навколишнього середовища	32
1.6. Висновок.....	33
2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	34
2.1. Принципи вимірювання на основі явища поверхневого плазмонного резонансу.....	34
2.2. Розрахунок товщини золотої плівки.....	37
2.3. Структурна схема вимірювального елемента.....	400
2.3.1. Призма	422
2.3.2. Лазерний діод.....	433
2.3.3. Драйвер лазера.....	444
2.3.4. Лінза-коліматор	455
2.3.5. Поляризатор	478
3. КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	522
3.1. Друкована плата вимірювального модуля	522
3.1.1. Розробка конструкції друкованої плати вимірювального модуля	522
3.1.2. Розрахунок конструкції друкованої плати	555

3.2. Висновок.....	5855
ВИСНОВКИ.....	56
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	57
ДОДАТОК І. ДІЕЛЕКТРИЧНА ФУНКЦІЯ ЗОЛОТА	62

					МРП.171.081.001	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум. докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

ППР – поверхневий плазмонний резонанс

ППХ – поверхневі плазмонні хвилі

ОКГ – оптичний квантовий генератор

					МП.171.081.001	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум. докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Розвиток науки та техніки постійно вимагає від дослідників все нових і нових методів та інструментів, які повинні забезпечити поставлені вимоги щодо точності вимірювання та швидкості реєстрування отриманої інформації.

Існуючі на даний час методи вимірювання характеристик різних середовищ та спостереження за динамікою процесів вимагають безпосереднього втручання в сам процес. Але усі ці методи, чи то добавляння різних реагентів, за реакціями яких роблять висновок стосовно вимірюваних характеристик, чи то інші методи, які дозволяють реєструвати певні зміни після взаємодії реагуючого органу з середовищем, будучи в певній мірі інерційними методами, досить часто не можуть задовольнити поставлених вимог щодо швидкості реєстрації та чистоти експерименту.

Тому, для задоволення поставлених вимог, потрібні принципово нові методи та способи реєстрації отриманих результатів. Одним із таких методів є використання явища поверхневого плазмонного резонансу. Біосенсор, який досліджується у роботі, дозволяє з великою точністю вимірювати характеристики середовищ, і водночас надзвичайно оперативно слідкувати за динамікою перебігу процесів у цих середовищах.

Біосенсиори, в яких використовується явище поверхневого плазмонного резонансу, є тонкоплівковими рефрактометрами, які вимірюють зміни показника заломлення на поверхні металевої плівки. Поверхневі плаزمони збуджуються світловими хвилями, які поширюються вздовж металевої плівки, і їх затухаюче поле зондує середовище, яке безпосередньо прилягає до металевої плівки. Зміна показника заломлення діелектрика викликає зміну сталої поширення поверхневого плазмону, який через умову зв'язку змінює характеристики світлової хвилі, зв'язаної з поверхневим плазмоном (кут зв'язку, довжину хвилі зв'язку, інтенсивність, фазу).

Багато різних біосенсорів побудовані на такому принципі. Вони поділяються на сенсори з амплітудною, фазовою та частотною модуляцією.

					МП.171.081.001	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум. докум.	Підпис	Дата		

У даній роботі розглянуто біосенсиори на поверхневому плазмовому резонансі з амплітудною модуляцією відбитого монохроматичного світла.

Даний біосенсор дозволяє вимірювати концентрації різноманітних хімічних та біологічних речовин (останніх після покриття золотої плівки призми спеціальними речовинами), а також визначати показники заломлення середовищ в діапазоні від 1 до 1,83. Біосенсор спроектовано для використання в лабораторних умовах. Особливістю його конструкції є можливість виведення сигналу на комп'ютер для подальшого його оброблення і для можливості відслідковувати динаміку перебігу різних процесів.

					МП.171.081.001	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум. докум.	Підпис	Дата		

1. ОГЛЯД НАУКОВО ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ПО ПЛАЗМОННИМ КОЛИВАННЯМ

1.1. Поверхневий плазмонний резонанс

Явище поверхневого плазмонного резонансу (ППР) та його застосування для побудови дуже чутливих детекторів бере свій початок із дослідження, здійсненого Робертом Вудом в 1902 році коли він спостерігав картину аномального поглинання поляризованого світла, коли він освітив дзеркало з дифракційною ґраткою на його поверхні.

Лорд Релей намагався дати Фізичну інтерпретацію цього явища, потім її уточнювали інші фізики. Але повне пояснення явища не було відоме аж до 1968 року, коли Отто, а через декілька років Кретчман і Райзер повідомили про збудження поверхневих плазмонів і дали повне пояснення цього явища. А застосування датчиків на ППР для біомолекулярного моніторингу вперше було продемонстровано в 1983 році Лідбергом.

Коротко пояснимо суть даного явища для того, щоби перейти до більш детального огляду використання датчиків на ППР.

Розглянемо експериментальну установку зображену на рис. 1.1. Якщо промінь поляризованого світла через призму спрямувати на датчик з тонкою плівкою металу (зазвичай це золото), яка нанесена на його верхню сторону, то промінь буде відбиватися від металевої плівки як від дзеркала. Якщо змінювати кут падіння і реєструвати інтенсивність відбитого світла, то інтенсивність відбитого світла буде проходити через деякий мінімум (рис. 1.1., лінія А). При такому куті падіння (коли спостерігається мінімум) світло збуджує поверхневі плаزمони, викликаючи поверхневий плазмонний резонанс, що і є причиною появи мінімуму на кривій інтенсивності відбитого світла. Фотони р-поляризованого світла, поглинаючись, можуть взаємодіяти з вільними електронами металу, спричинюючи хвилеподібні коливання вільних електронів. А внаслідок поглинання електромагнітних хвиль зменшується інтенсивність відбитого світла.

					МРП.171.081.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум. докум.	Підпис	Дата		12

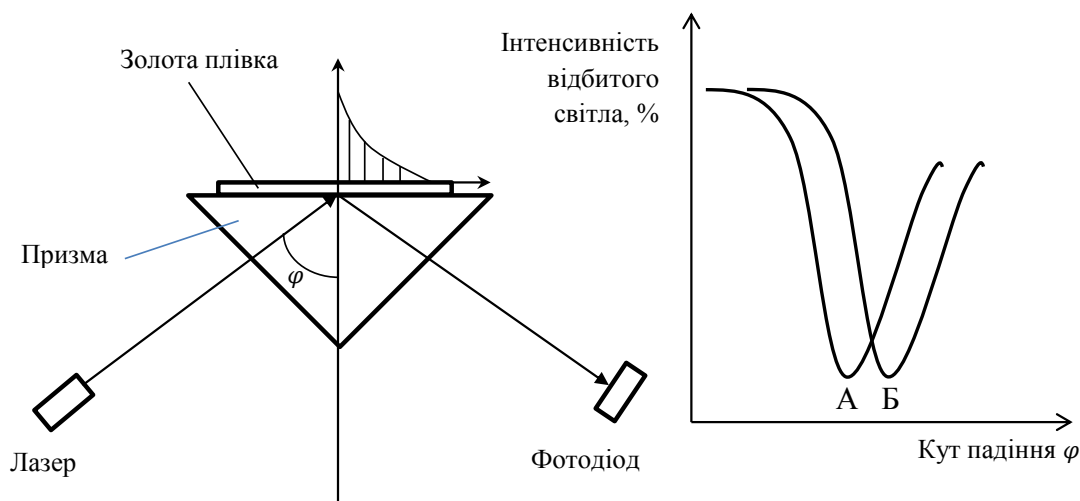


Рис. 1.1. Схематичне зображення установки для збудження поверхневого плазмонного резонансу.

Кут, при якому спостерігається максимальне поглинання інтенсивності падаючого світла, називається резонансним кутом або кутом ППР. Значення кута ППР залежить від оптичних характеристик системи (наприклад від показника заломлення середовища по обидва боки металу). Коли показник заломлення призми не змінюється то внаслідок адсорбції деякої маси (наприклад протеїнів) може змінитися показник заломлення середовища, яке безпосередньо прилягає до металевій поверхні. Звідси можуть змінюватися і умови для збудження поверхневого плазмонного резонансу. А зсув значення кута ППР (рис. 1.1., крива Б) можна використати для отримання інформації про кінетику процесу, наприклад про абсорбцію протеїнів на поверхні.

Для того, щоби використовувати явище ППР потрібно знати фізичну природу даного явища, яку цілком можна описати виходячи з рівнянь класичної електродинаміки.

1.2. Плазмонні коливання

Поверхневі плазмони є електромагнітними хвилями, які поширюються в достатньо тонкому шарі по межі поділу між провідником та діелектриком. Вони виникають як результат взаємодії електромагнітних полів діелектрика з електронною плазмою провідника.

Виходячи з хвильового рівняння для електромагнітного поля розглянемо основні властивості поверхневих плазмонів, які поширюються в межах одиночної плоскої межі поділу між діелектриком та металом. Поверхневі хвилі характеризуються дисперсійним співвідношенням і просторовою конфігурацією поширення електромагнітних полів.

Для дослідження властивостей поверхневих плазмонів (ПП) розглянемо рівняння Максвелла у випадку плоскої межі поділу між діелектриком та металом. Рівняння Максвелла запишемо у такому вигляді:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}\end{aligned}\tag{1.1}$$

Для подальшого розгляду зручно перетворити рівняння Максвелла до вигляду хвильових рівнянь. При відсутності зовнішніх зарядів і струмів ($\rho = 0$ і $\mathbf{J} = 0$) можна отримати:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{D}}{\partial t^2}\tag{1.2}$$

Використовуючи тотожність $\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E}$, а також $\nabla \cdot (\varepsilon \cdot \mathbf{E}) \equiv \mathbf{E} \cdot \nabla \varepsilon + \varepsilon \cdot \nabla \mathbf{E}$ і враховуючи, що при відсутності зовнішніх джерел $\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$, рівняння (1.2) можна переписати у вигляді

$$\nabla \left(-\frac{1}{\varepsilon} \mathbf{E} \cdot \nabla \varepsilon \right) - \nabla^2 \mathbf{E} = -\mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (1.3)$$

У випадку малих змін діелектричних властивостей середовища $\varepsilon = \varepsilon(\mathbf{r})$ на масштабах порядку довжини хвилі, рівняння (1.3) зводиться до хвильового рівняння

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{\varepsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.4)$$

Щоби привести рівняння (1.4) до зручного вигляду для описання локалізованих хвиль, зробимо наступні пояснення. По-перше, часову залежність електричного поля будемо вважати гармонічною: $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r})e^{-i\omega t}$. Підставляння даної формули в рівняння (1.4) дає нам відоме рівняння Гельмгольца

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k_0^2 \varepsilon \mathbf{E} = 0 \quad (1.5)$$

де $k_0 = \omega/c$ – хвильовий вектор хвилі, яка поширюється у вакуумі.

Наступним кроком необхідно конкретизувати геометрію задачі. Для простоти обмежимося одновимірним випадком, в якому ε залежить лише від однієї просторової координати, наприклад $\varepsilon = \varepsilon(z)$. Будемо розглядати хвилю, яка поширюється вздовж осі Ох декартової системи координат, а в напрямку осі Оу середовище будемо вважати однорідним (рис. 1.2). В нашому випадку для поверхневої електромагнітної хвилі площина $z = 0$ співпадає з межею поділу, а тому електричне поле хвилі можна записати у вигляді $\mathbf{E}(x, y, z) = \mathbf{E}(z)e^{i\beta x}$. Комплексний параметр $\beta = k_x$ називається сталою поширення біжучої хвилі і відповідає хвильовому вектору в напрямку поширення. Підстановка даного виразу в рівняння (1.5) приводить до потрібної нам форми хвильового рівняння:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}(z)}{\partial z^2} + (k_0^2 \varepsilon - \beta^2) \mathbf{E} = 0 \quad (1.6)$$

Очевидно, що таке ж рівняння є справедливим і для магнітного поля \mathbf{H} .

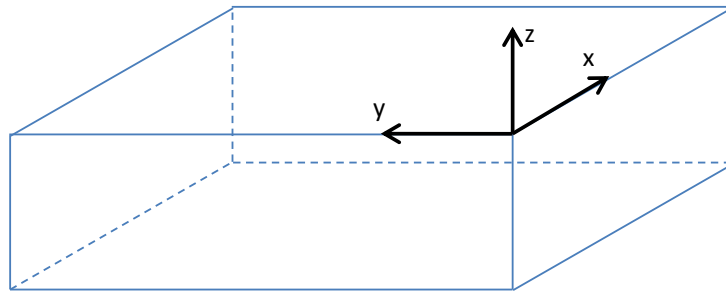


Рис. 1.2. Геометрія планарного хвильовода. Хвиля поширюється вздовж осі Ox декартової системи координат.

Рівняння (1.6) є вихідним пунктом для загального аналізу електромагнітних мод, які поширюються у хвильоводах. Для того щоби із хвильового рівняння знайти просторову конфігурацію і закон дисперсії хвиль, необхідно знайти явні вирази для різних компонент полів \mathbf{E} і \mathbf{H} . Це можна легко знайти із рівнянь Максвелла.

У випадку гармонічної залежності від часу ($\partial/\partial t = -i\omega$) отримаємо таку систему зв'язаних рівнянь:

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = i\omega\mu_0 H_x \quad (1.7a)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = i\omega\mu_0 H_y \quad (1.7б)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = i\omega\mu_0 H_z \quad (1.7в)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = -i\omega\varepsilon_0 E_x \quad (1.7\Gamma)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = -i\omega\varepsilon_0 E_y \quad (1.7\Delta)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = -i\omega\varepsilon_0 E_z \quad (1.7\epsilon)$$

Для хвилі, яка поширюється вздовж осі Ох ($\partial/\partial t = i\beta$) і однорідної вздовж осі Оу ($\partial/\partial t = 0$), система рівнянь спрощується таким чином:

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = -i\omega\mu_0 H_x \quad (1.8a)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - i\beta E_z = i\omega\mu_0 H_y \quad (1.8\delta)$$

$$i\beta E_x = i\omega\mu_0 H_z \quad (1.8\beta)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = i\omega\varepsilon_0 \varepsilon E_x \quad (1.8\Gamma)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} - i\beta H_z = -i\omega\varepsilon_0 \varepsilon E_y \quad (1.8\Delta)$$

$$i\beta H_y = -i\omega\varepsilon_0 \varepsilon E_z \quad (1.8\epsilon)$$

Можна показати, що дана система має два самоузгоджених розв'язки, які відповідають хвилям з різними поляризаціями. Перший розв'язок визначає поперечні магнітні хвилі (ТМ-моди), в яких відмінні від нуля лише компоненти полів E_x , E_z , і H_y , друге – поперечні електричні хвилі (ТЕ-моди) з відмінними від нуля H_x , H_z , E_y .

Для ТМ-мод система рівнянь (1.8) зводиться до

$$E_x = -i \frac{1}{\omega\varepsilon_0 \varepsilon} \frac{\partial H_y}{\partial z} \quad (1.9a)$$

$$E_z = -\frac{\beta}{\omega\varepsilon_0 \varepsilon} H_y \quad (1.9\delta)$$

а хвильове рівняння в такому випадку набуде вигляду

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} + (k_0^2 \varepsilon - \beta^2) H_y = 0 \quad (1.9в)$$

Аналогічна система рівнянь для ТЕ-мод має вигляд

$$H_x = i \frac{1}{\omega \mu_0} \frac{\partial E_y}{\partial z} \quad (1.10а)$$

$$H_z = -\frac{\beta}{\omega \mu_0} E_y \quad (1.10б)$$

а відповідне хвильове рівняння:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} + (k_0^2 \varepsilon - \beta^2) E_y = 0 \quad (1.10в)$$

Наведені вище рівняння дозволяють аналізувати поведінку плазмонних коливань.

1.3. Плазмони на плоскій межі поділу «метал-діелектрик»

Найпростішою структурою, в якій можуть існувати поверхневі плазмонні хвилі, є плоска межа поділу (рис. 1.3) між непоглинаючим діелектриком, який заповнює півпростір $z > 0$ з дійсною діелектричною проникністю $\varepsilon_2 > 0$ і струмопровідним півпростором $z < 0$, який описується діелектричною функцією $\varepsilon_1(\omega)$. З того, що півпростір $z < 0$ має металеві властивості, випливає, що $Re[\varepsilon_1] < 0$. Як відомо з теорії металів Друде-Зоммерфельда, дана вимога задовольняється при частотах, які нижчі за частоту об'ємних плазмонів ω_p . Ми шукаємо розв'язок у вигляді біжучих

хвиль, які локалізовані поблизу межі поділу, тобто таких, які згасають вздовж z-напрямку.

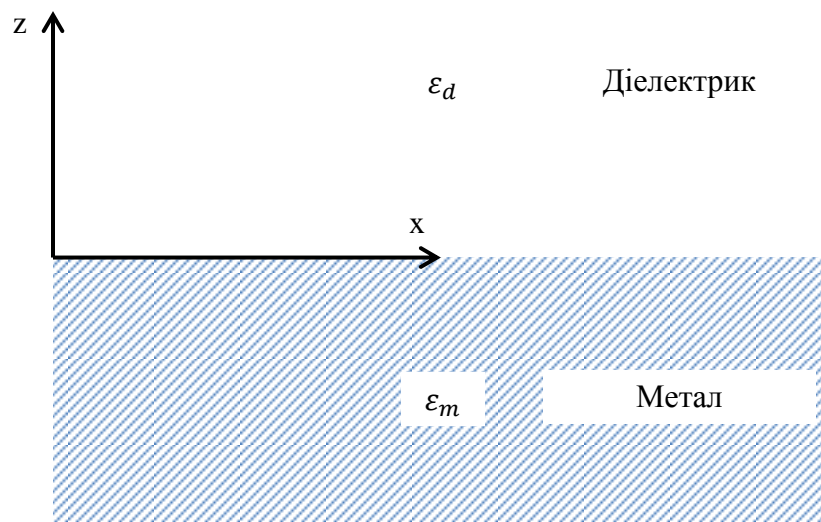


Рис. 1.3. Геометрія задачі про поверхневі плазмони на межі «метал-діелектрик». Хвилі поширюються вдовж межі осі Ох декартової системи координат.

Розглянемо розв'язки для ТМ-мод. Використовуючи першу систему рівнянь (1.9), в обох півпросторах отримаємо

$$H_y(z) = A_2 e^{i\beta x} e^{-k_2 z} \quad (1.11a)$$

$$E_x(z) = iA_2 \frac{1}{\omega \epsilon_0 \epsilon_2} k_2 e^{i\beta x} e^{-k_2 z} \quad (1.11б)$$

$$E_z(z) = -A_1 \frac{\beta}{\omega \epsilon_0 \epsilon_2} e^{i\beta x} e^{-k_2 z} \quad (1.11в)$$

при $z > 0$ і

$$H_y(z) = A_1 e^{i\beta x} e^{k_1 z} \quad (1.12a)$$

$$E_x(z) = -iA_1 \frac{1}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_1} k_1 e^{i\beta x} e^{k_1 z} \quad (1.12б)$$

$$E_z(z) = -A_1 \frac{\beta}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_1} e^{i\beta x} e^{k_1 z} \quad (1.12в)$$

при $z < 0$. Тут $k_i = k_{z,i}$ ($i = 1,2$) – проекція уявного хвильового вектора на напрямок, який перпендикулярний до межі поділу двох середовищ. Величина, обернена до неї $z = 1/|k_z|$ визначає довжину затухання полів в даному напрямку і є поперечним масштабом локалізації хвилі. Неперервність H_y і $\varepsilon_i E_z$ на межі поділу двох середовищ вимагає рівності $A_1 = A_2$, а також

$$\frac{k_2}{k_1} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (1.13)$$

Варто зазначити, що при вибраних знаках показників експонент в рівняннях (1.11) і (1.12) локалізація хвилі поблизу поверхні вимагає виконання нерівності $Re[\varepsilon_1] < 0$ при $\varepsilon_2 > 0$. Це означає, що поверхневі хвилі можуть існувати лише на межах поділу матеріалів з протилежними знаками дійсних частин їх діелектричної проникності, тобто лише на межах поділу металів та діелектриків. Більш того, вираз для H_y повинен задовольняти хвильовому рівнянню (1.9в), що дає

$$k_1^2 = \beta^2 - k_0^2 \varepsilon_1 \quad (1.14а)$$

$$k_2^2 = \beta^2 - k_0^2 \varepsilon_2 \quad (1.14б)$$

Комбінуючи ці рівняння з (1.13), ми отримаємо основний результат даного розділу - дисперсійне відношення для ПП, які поширюються вздовж межі поділу між двома півпросторами

$$\beta = k_0^2 \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}} \quad (1.15)$$

Даний вираз є справедливим як для дійсних так і для комплексних значень ε_1 , тобто як для таких провідників, які поглинають, так і для таких, які не поглинають.

Без детального аналізу зазначимо, що ПП можуть існувати лише при ТМ-поляризації, а при ТЕ-поляризації – ПП не існують.

Розглянемо більш детально властивості ПП, які впливають із дисперсійного відношення. На рис.1.4. представлені розраховані з допомогою (1.15) дисперсійні співвідношення ПП для межі поділу метал-повітря ($\varepsilon_2 = 1$) і метал-кварцове скло ($\varepsilon_2 = 2,25$). В обох випадках вважається, що метал не поглинає енергії, і діелектрична проникність визначається із співвідношення Друде $\varepsilon_1 = 1 - \omega_p^2/\omega^2$. На наведеному графіку частота ω нормована на плазмову частоту ω_p , також на малюнку наведено дійсну і уявну частину хвильового вектора β . Оскільки ПП мають характер зв'язаних коливань, їм відповідають ділянки дисперсійних кривих, які розміщені справа від дисперсійних кривих світла, яке поширюється в повітрі і кварці відповідно. Таким чином, для збудження ПП з допомогою електромагнітних хвиль потрібно спеціальні методи узгодження, такі як решіткове введення чи призматичний зв'язок. Електромагнітні хвилі в металі виникають в режимі прозорості $\omega > \omega_p$. Для частот, які відповідають різним модам, знаходиться щілина, в якій хвильове число β приймає чисто уявні значення, і, відповідно, поширення хвиль є неможливим.

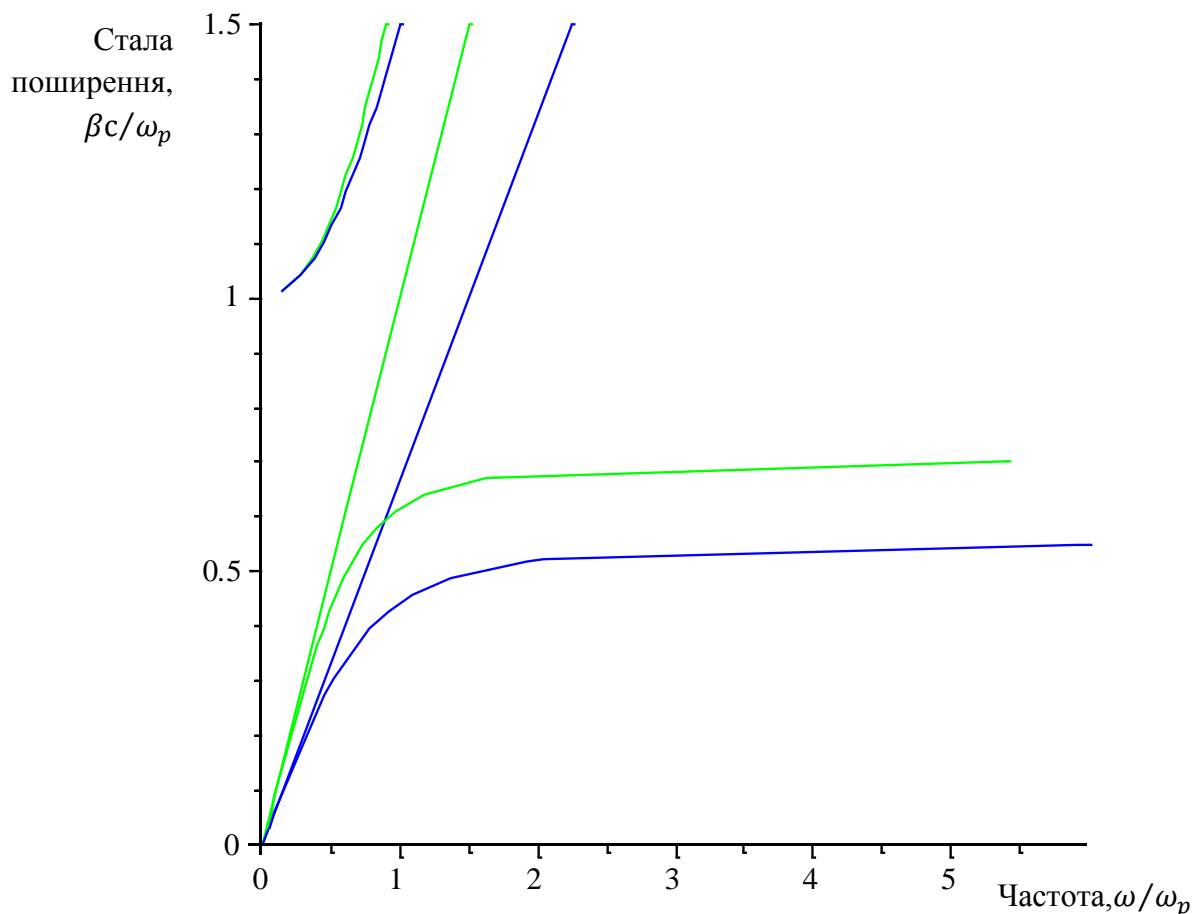


Рис. 1.4. Дисперсійні криві ПП, які поширюються вздовж межі поділу між металом (з дуже малою частотою електронних співударянь) і повітрям (зелені лінії) і кварцом (сині лінії).

При малих хвильових числах, які відповідають відносно низьким частотам (середина інфрачервоного діапазону і нижче) стала поширення ПП близький до значення k_0 , який відповідає оптичному закону дисперсії, і поля проникають в глибину діелектрика на відстань, яка значно більша за довжину хвилі. Відповідно, в такому режимі поверхневі плазмони набувають природи ковзаючого світлового поля, яке відоме в літературі як хвилі Зоммерфельда-Ценнека.

В протилежному режимі великих хвильових чисел частота ПП наближається до характерної частоти поверхневого плазмона:

$$\omega_{sp} = \frac{\omega_p}{\sqrt{1 + \varepsilon_2}} \quad (1.16)$$

що можна показати підставляючи діелектричну проникність газу вільних електронів в рівняння 1.15. При наближенні нехтовно малого згасання для електронів провідності (мається на увазі $Im[\varepsilon_1(\omega)] = 0$) хвильове число β прямує до нескінченності, а групова швидкість $v_g \rightarrow 0$ у випадку частоти, яка прямує до ω_{sp} . Таким чином мода набуває електростатичного характеру і називається поверхневим плазмоном.

1.4. Збудження поверхневих плазмонів на плоскій межі поділу середовищ

Поверхневі плазмони, які поширюються вздовж плоскої межі поділу між провідником і діелектриком, є двовимірними електромагнітними хвилями. Локалізація хвилі забезпечується із-за того що в діелектрику реальна частина хвильового вектора β більша за уявну частину хвильового вектора k і це приводить до просторового згасання хвилі в напрямку, який перпендикулярний (в обидві сторони) до межі поділу. Дисперсійна крива ПП лежить справа від дисперсійної кривої об'ємної хвилі діелектрика (в об'ємі дисперсійне співвідношення для хвиль $\omega = ck$), і без застосування спеціальних методів фазового синхронізму збудження світловими пучками плазмонів у даному випадку є неможливим.

Збудження поверхневих плазмонів світловими пучками на плоских межах поділу метал/діелектрик неможливо, так як $\beta > k$, де k – хвильовий вектор світла на межі поділу із сторони діелектрика. Очевидно, що проекція хвильового вектора фотонів, які падають під кутом θ , $k_x = k \sin \theta$, на нормаль до поверхні завжди менша, ніж стала поширення β навіть при ковзаючому падінні фотонів.

Можна добитися фазового синхронізму ПП в трьохшаровій структурі, яка складається із тонкої металевої плівки, яка розміщена між двома

					МРП.171.081.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум. докум.	Підпис	Дата		23

діелектриками з різною діелектричною проникністю. Для спрощення ситуації покладемо, що один із діелектриків – повітря ($\epsilon = 1$). Промінь, який відбивається від межі поділу між діелектриком, який є призмою з діелектричною проникністю ϵ (рис. 1.6), і металом, буде мати імпульс в площині $k_x = k\sqrt{\epsilon}\sin\theta$, який є достатнім для збудження ПП на межі поділу між металом і діелектриком з більш низькою діелектричною проникністю, тобто, в нашому випадку – на межі поділу метал/повітря. Таким чином, забезпечується збудження ПП з сталою поширення β , який лежить між дисперсійними кривими повітря і діелектрика. Збудження ПП проявляється у зміні інтенсивності відбитого променя. Відзначимо, що досягнути фазового синхронізму ПП на межі поділу призма/метал неможливо, так як відповідна дисперсійна крива лежить поза світловим конусом призми (рис. 1.5)

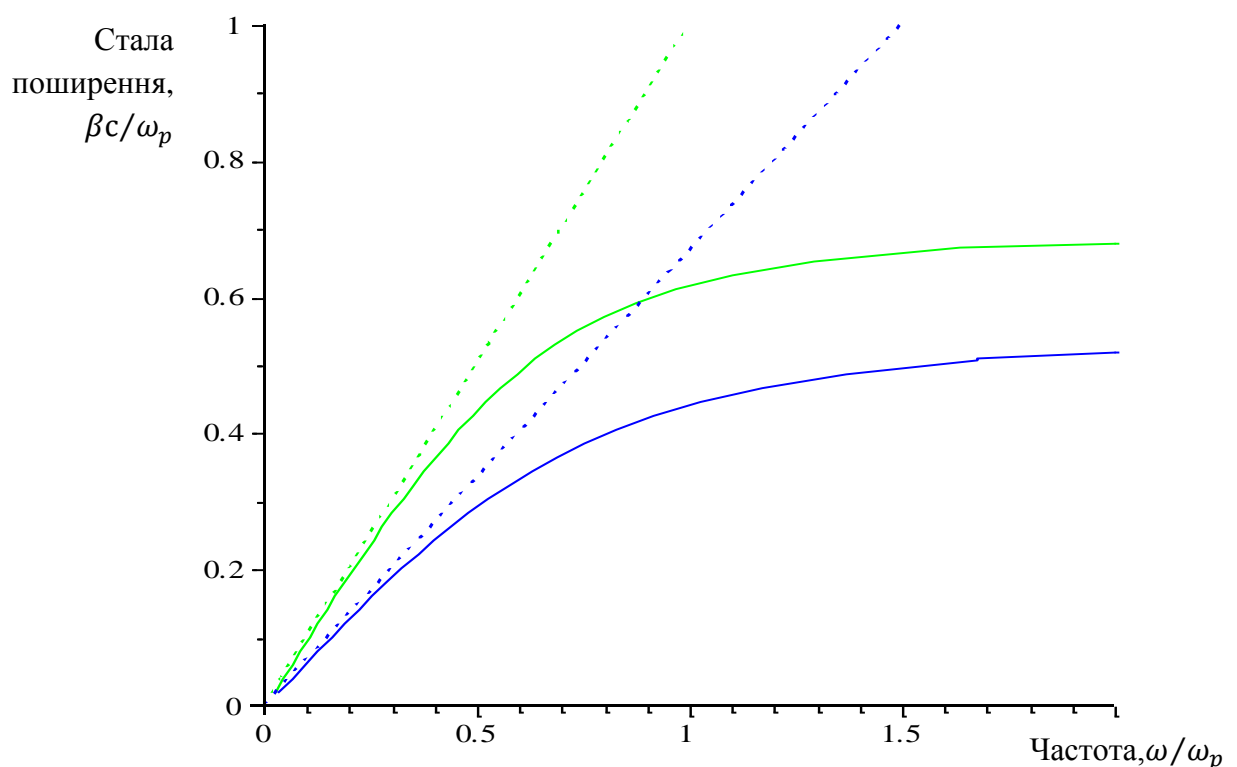


Рис. 1.5. Дисперсія ПП для призматичного введення. Доступні лише сталі поширення між штриховими лініями повітря і призми.

Відповідно, розглянута схема, в якій порушується повне внутрішнє відбивання, приводить до тунелювання полів на межі поділу метал/повітря, де і відбувається збудження ПП.

Призматичне з'єднання може мати дві різні геометрії, які показано на рис. 1.6. Найбільш простою є конфігурація запропонована в роботі Кретчмана, в якій тонка металева плівка напильюється на скляну призму. Фотони із потоку, який відбивається від скляної сторони під кутом, який більший за критичний кут, проходять через металеву плівку і збуджують ПП на межі метал повітря. Інша геометрія – це конфігурація, яка запропонована Отто. В цій геометрії призма відділена від металевої плівки тонким поверхневим шаром. Повне внутрішнє відбивання виникає на межі поділу призма/повітря, збуджуючи ПП через тунелювання на межі поділу повітря/метал. Конфігурація Отто є кращою у тому випадку, якщо потрібно вивчити стан поверхні без контакту з нею.

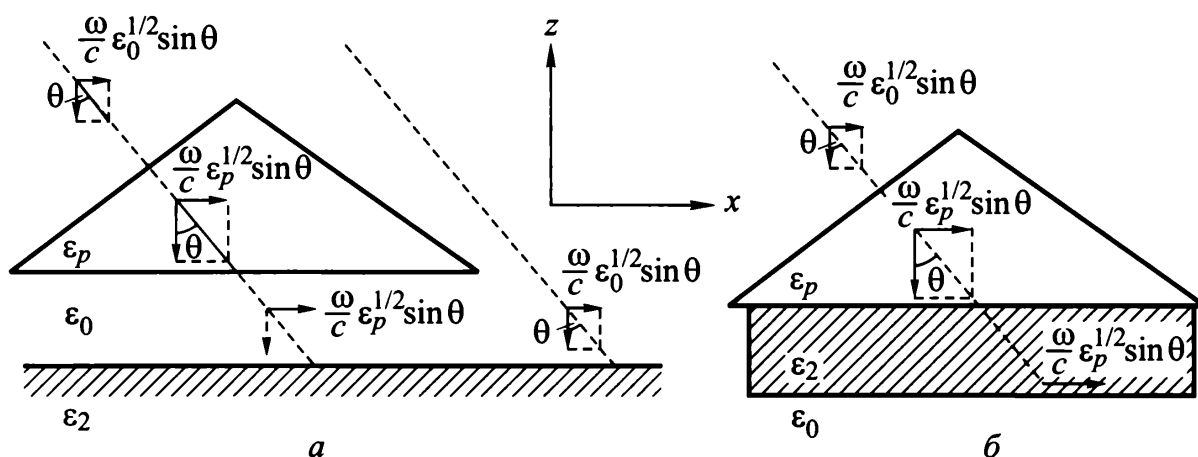


Рис. 1.6. Збудження поверхневих плазмонів з допомогою методу порушеного внутрішнього відбивання: а – геометрія Отто; б – геометрія Кретчмана.

1.5. Використання явища поверхневого плазмонного резонансу

Схема установки, яку показано на самому початку дозволяє вимірювати зміну показника заломлення в області, яка прилягає до поверхні

металевої плівки. Але до того ж метод ППР дає можливість для спостереження за процесом зміни показника заломлення в просторі, який безпосередньо прилягає до металевої поверхні. Коли показник заломлення змінюється, кут, при якому спостерігається мінімум інтенсивності, зсувається так, як це показано на рис. 1.7, де крива А зображує початкове значення інтенсивності відбитого світла в залежності від кута і крива Б показує таку ж залежність, але вже після зміни показника заломлення. Взагалі метод ППР не лише придатний для вимірювання різниці між двома станами, але може також відслідкувати ці зміни в часі. Тобто можна в режимі реального часу слідкувати за зміною резонансного кута, значення якого є функцією стану середовища. Якщо ці зміни відбуваються при біомолекулярних реакціях, то кінетика реакцій може бути вивчена в реальному часі.

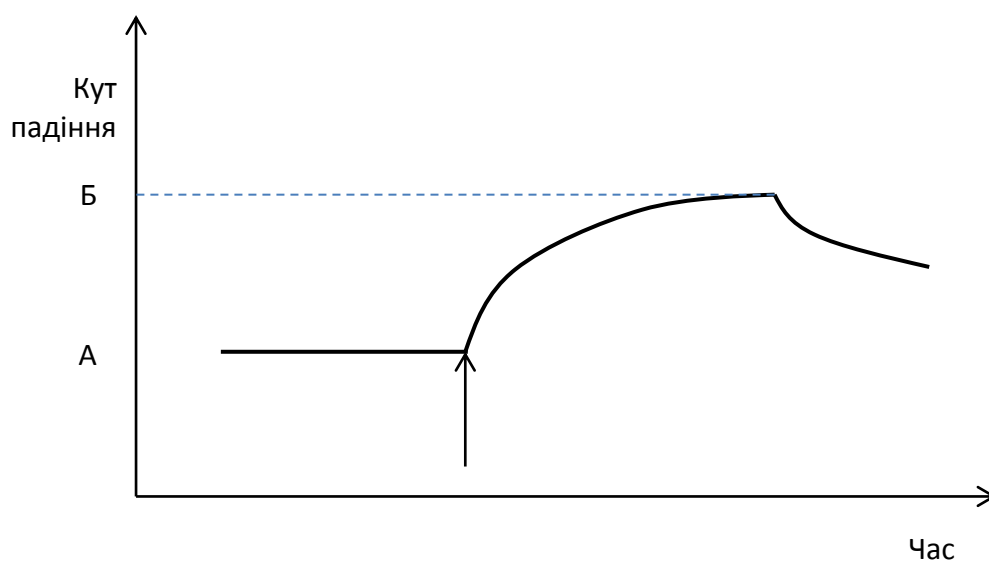


Рис. 1.7. Зміна кута ППР при зміні характеристик середовища в часі. Стрілка показує момент початку адсорбції на поверхні металу

ППР датчики можуть досліджувати лише дуже обмежену частину середовища (фіксований об'єм біля металевої поверхні). Глибина проникнення електромагнітного поля сигналу зазвичай не перевищує

декількох сотень нанометрів, спадаючи з відстанню від металевого шару за експоненціальним законом.

ППР датчики не мають внутрішньої селективності: усі зміни показника заломлення в спадаючому полі будуть відбиватися на зміні сигналу. Ці зміни можуть бути пов'язані із зміною показника заломлення середовища, наприклад, зміна в складі буферної композиції чи її концентрації, також абсорбція матеріалу на поверхні датчика може викликати зміни в показнику заломлення. Тому кількість абсорбованої речовини може бути визначена лише після введення базової лінії буфера, як це показано на рис. 1.7. Для того, щоби дозволити ППР датчиками селективно вимірювати, їх поверхні повинні бути модифіковані лігандами, придатними для селективного вибору цільових об'єктів, але не схильних до абсорбції ніяких інших компонентів наявних в пробі чи в буферному середовищі.

1.5.1. Послідовність виконання якісного аналізу

В найпростішому випадку вимірювання з допомогою ППР, цільові компоненти, або аналіти, захоплюються з допомогою захоплюючих елементів, які також називаються лігандами (рис. 1.8). Ліганди закріплюються на поверхні датчика ще до початку вимірювання. Багато датчиків з закріпленими лігандами на їх поверхні є комерційно доступними, і багато більше можна виготовити самостійно в лабораторних умовах.

Найпростішим випадком, коли захоплення аналіту лігандом призводить до появи вимірюваного сигналу (викликає зміну показника заломлення достатньої величини), називають непрямым вимірюванням. Рис. 1.9. показує поступову зміну сигналу датчика у вимірювальному циклі з непрямым детектуванням (прямим детектуванням називається такий процес, коли зміни відслідковуються без залучення лігнадів).

					МРП.171.081.001	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум. докум.	Підпис	Дата		

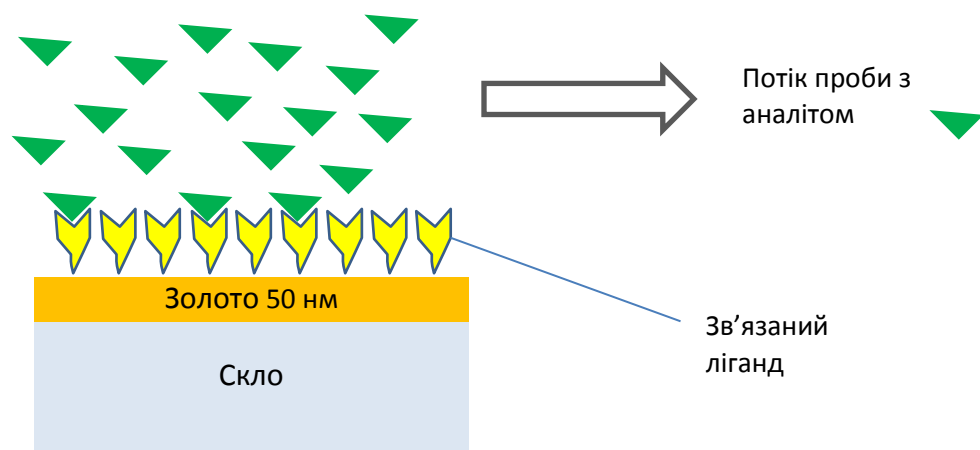


Рис. 1.8. Схематичне зображення прямого детектування: аналіт захоплюється лігандом, який зв'язаний на поверхні сенсора.

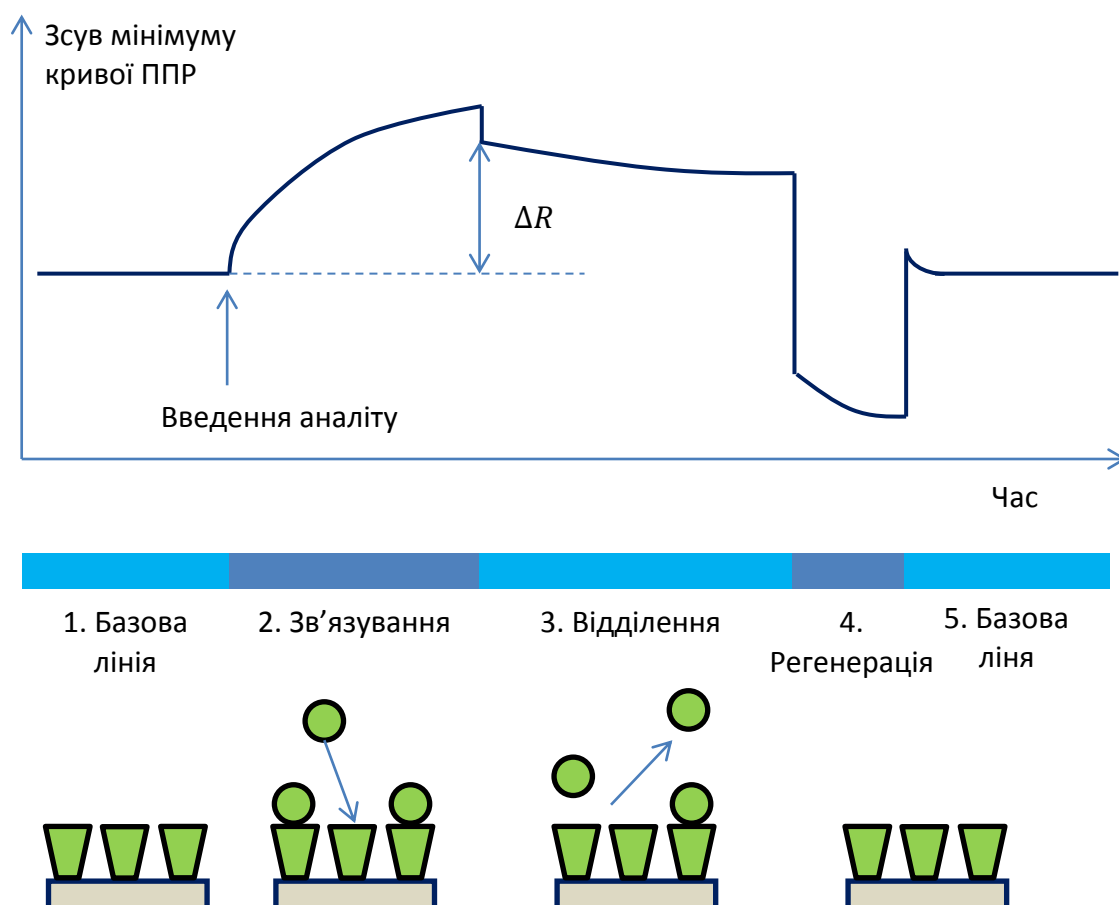


Рис. 1.9. Сенсограма, яка показує послідовність кроків виконання аналізу.

Кожне вимірювання починається з обробки поверхні датчика потрібним буферним розчином (1). Надзвичайно важливим є мати достовірну базову лінію перед кожним початком вимірювання. З цього моменту поверхня датчика містить активні ліганди, які готові захоплювати цільові аналіти. При введенні розчину, який містить аналіти (2), вони захоплюються поверхнею датчика. Також інші компоненти із проби можуть прилипати до поверхні датчика; без потрібного вибору ліганду, це прилипання може бути не специфічним, і тому швидко руйнується. На цьому кроці кінетика адсорбції молекул аналіту може бути виміряна в режимі реального часу. Потім буферний розчин вводиться на поверхню сенсора і не специфічні зв'язки з лігандами руйнуються (3). Як показано на рисунку, акумульована на поверхні маса може бути визначена з відгуку ППР (ΔR). Також на цьому кроці розпочинається дисоціація аналіту, і це дозволяє вивчити кінетику процесу дисоціації. В кінці вводиться спеціальний регенераційний розчин, який руйнує специфічні зв'язки між аналітом і лігандом (4). Якщо ліганд правильно закріплений на поверхні датчика, то після обробки він і залишається на поверхні датчика, а аналіт повністю виводиться. Дуже важливо правильно дотримуватися усіх кроків при виконанні аналізу, а особливо промивання поверхні регенераційним розчином, так як це суттєво підвищує можливість повторного використання датчика з осадженим на нього лігандом до сотні разів а то і більше. Після виконання регенерації, уся осаджена маса видаляється і вимірювані значення знову повертаються до базової лінії.

1.5.2. Кількісний аналіз

Поряд з кінетичним і термодинамічним аналізом, вимірювання з допомогою ППР дозволяє також визначати концентрацію аналіту в пробі (кількісний аналіз). В такому випадку, спочатку потрібно в різні цикли вимірювання наносити аналіт з різними концентраціями. Виміряна сенсограма для різних концентрацій дає накладені графіки, які подібні до

					МРП.171.081.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум. докум.	Підпис	Дата		29

зображених на рис. 1.10. Такі графіки мають пологі ділянки кривих, які зростають разом із зростанням концентрації аналіту.

Калібрувальну криву для визначення концентрації можна отримати через побудову відгуку ΔR через визначені інтервали часу по відношенню до концентрації.

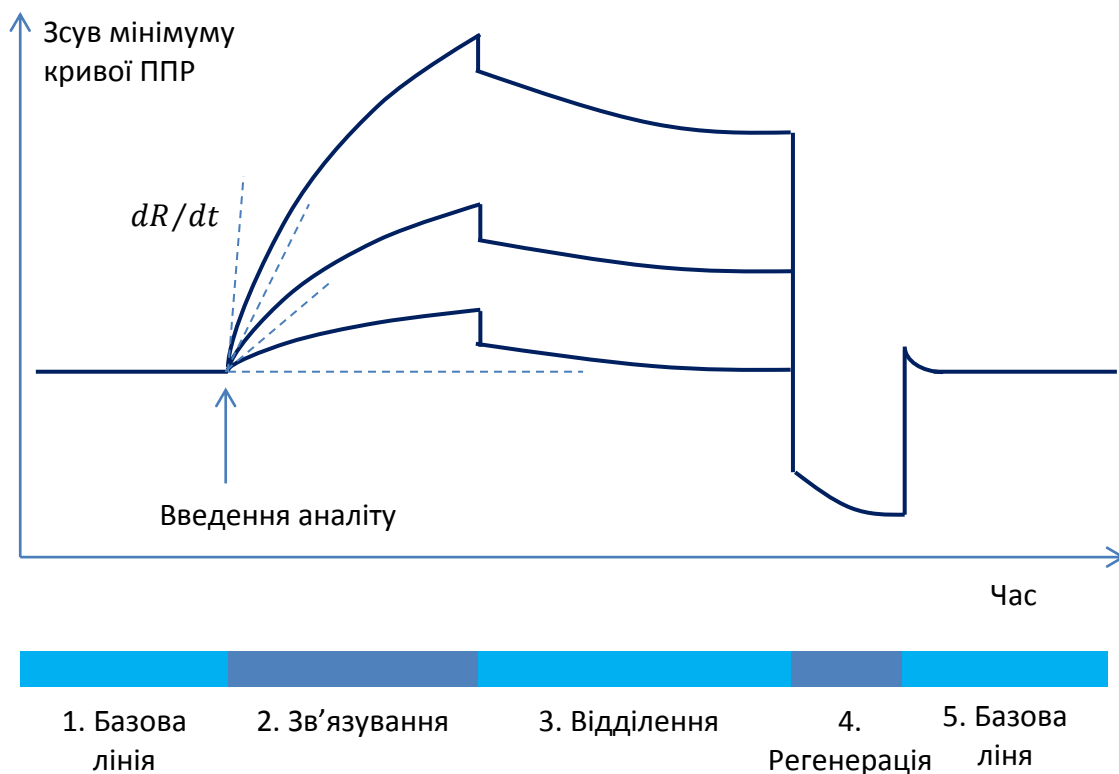


Рис. 1.10. Типова сенсограма з накладеними графіками для різних концентрацій розчинів

Якщо аналізуються проби, які мають невідому концентрацію аналіту, то зазвичай роблять кратні розчини, для прикладу в 10, 100 і 1000 разів, або для більш акуратного визначення ряд розчинів з кратністю 2. Якщо концентрація аналіту в пробі є дуже високою, то нерозведена проба дасть результат на вищих областях калібрувальної кривої. Розведені розчини, таким чином, можуть дати точки по нижчих секціях калібрувальної кривої і концентрація аналіту може бути визначена за положенням виміряної точки на калібрувальній кривій.

Як згадувалося вище, ППР детектування є методом визначення зміни показника заломлення на поверхні датчика. Ці зміни на практиці здійснюються через зміну маси речовини, яка осідає на поверхні датчика. Пряме детектування можливе лише тоді, коли захоплення аналіту призводить до значної зміни показника заломлення і це призводить до появи вимірюваного сигналу. Це можна легко зробити тоді, коли молекулярна маса аналіту є високою (в межах 1000 а.о.м. і більше). Однак, для малих молекул для спричинювання вимірюваних значень зміни показника заломлення, потрібна велика кількість молекул, і це робить аналіз менш чутливим. Якщо аналіт є малою молекулою (молекулярна маса менша 1000 а.о.м.) то часто пряме детектування не є придатним для застосування.

Детектування малих молекул може бути здійснене з використанням різних методів. Найбільш часто малі молекули детектуються в трьохшарових структурах, конкурентним методом чи методом подавлювання. У всіх методах не лише обмежена нижня межа вимірюваної концентрації, а також фізична кількість іммобілізованих елементів на поверхні датчика, який забезпечує максимальну граничну кількість.

1.5.3. Аналіз якості харчових продуктів та їх безпеки

Використання технології ППР біодатчиків для виконання аналізу харчових продуктів продовжує зростати і кількість публікацій щодо використання ППР біодатчиків для проведення таких аналізів, які відносяться до якості харчових продуктів і їх безпеки, невинно зростає. Цільовими аналітами в даному випадку є: патогени, токсини, наркотики, вітаміни, гормони, антитіла, хімічні забруднювачі, алергени і протеїни.

В останні роки значну кількість патогенів було виявлено з допомогою ППР біодатчиків. Сюди входять бактерії, найпростіші, гриби і мікроорганізми.

Кишкова паличка O157:H7 була вперше виявлена з допомогою ППР в 1998 році. Відтоді з'явилося значна кількість ППР біодатчиків для виявлення

					МРП.171.081.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум. докум.	Підпис	Дата		31

кишкової палички. Група дослідників використала комерційний ППР датчик Multiskop і моноклоновані антитіла закріплені на поверхні датчика вкритого протеїнами. Датчик демонстрував здатність прямого детектування кишкової палички при концентраціях нижчих за 10^4 клітин/мл. Згодом вони демонстрували, що в поєднанні з іммобілізацією антитіл через змішування SAM алканотіолятів той же ППР інструмент міг детектувати кишкову паличку O157:H7 при концентрації нижче ніж 10^2 клітин/мл.

Токсини, які причетні до безпеки харчових продуктів, в основному виробляються бактеріями, грибами і водоростями.

Стафілококовий ентеротоксин В (SEB) був виявлений з допомогою ППР датчика в 2000 році. Вони використовували комерційний ППР датчик Biacore X і SEB антитіла іммобілізовані в карбоксилметиловому шарі на поверхні сенсора з допомогою амінозв'язків. SEB було виявлено прямо в молоці і грибних пробах на рівні нижче 1 нг/мл. ППР детектування послідувало через ідентифікацію зв'язаних токсинів з допомогою матричної лазерної десорбції/іонізації часу прольотного (MALDI-TOF) мас-спектрометра. В 2002 році група Гомоли повідомила про виявлення SEB з використанням волоконно оптичного ППР датчика.

1.5.4. Моніторинг навколишнього середовища

Щодо аналізу проблем навколишнього середовища, то цільовими аналітами для ППР датчиків є пестициди, ароматичні вуглеводні, важкі метали, феноли, діоксини та ін..

Після демонстрації виявлення ППР біодатчиками можливості детектувати атразин та синазин в 1990 році, багато пестицидів було виявлено з допомогою ППР технології.

Група дослідників повідомила про портативні ППР датчики для виявлення атразину в воді з використанням методу подавлювання. Похідна атразину була іммобілізована на алканотіолятах SAM на вкритій золотим шаром поверхні датчика. Проба була вирощена з полі клонованих антитіл і

					МП.171.081.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум. докум.	Підпис	Дата		32

потім суміш була аналізована за допомогою ППР датчика. Рівень деталізації був встановлений на межі 1 пг/мл. Цикл вимірювання/регенерації зайняв 25 хвилин

Про детектування ППР датчиком іонів Cu^{2+} було повідомлено Окком та іншими. Їх датчик використовував тонкий полімерний шар, який містив squarylium барвник, який змінював свій показник заломлення абсорбуючи іони. Будучи зобов'язаним аномальної дисперсії яка супроводжувала цю абсорбцію, зміну показника заломлення субстанції можна спостерігати коли SQ барвник був підданий впливу Cu^{2+} іонами. Датчик розпізнавав Cu^{2+} в буферному розчині на рівні нижчому за 10^{-12} М.

1.6. Висновок

Як видно із всього описаного вище, явище поверхневого плазмонного резонансу є надзвичайно перспективним щодо його використання в приладах вимірювання показника заломлювання.

Виходячи із рівнянь Максвелла ми змогли отримати основні умови, які описують існування поверхневих плазмонних хвиль. Дані умови показують, що існування поверхневих плазмонних хвиль на межі поділу метал/діелектрик можливе лише при значній від'ємній дійсній частині діелектричної сталої металу. До того ж, вектор поширення поверхневих плазмонних хвиль є значно більшим за вектор поширення світлових хвиль тієї ж частоти. А це вимагає використання спеціальних методів узгодження, з допомогою яких можна поєднати електромагнітне випромінювання з поверхневими плазмонними хвилями.

До таких методів відносять методи призматичного зв'язку та методи дифракційних ґраток. В свою чергу метод призматичного зв'язку поділяється за своєю геометрією на геометрію Отто та геометрію Кретчмана, яка є значно простішою за своєю реалізацією.

					МП.171.081.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум. докум.	Підпис	Дата		33

2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

2.1. Принципи вимірювання на основі явища поверхневого плазмонного резонансу

Поверхнево-плазмонні резонансні біодатчики є датчики які складаються з біорозпізнавального елементу, що розпізнає, і здатного взаємодіяти з вибраним аналітом і поверхнево-плазмонного резонансного перетворювача, який перетворює результат зв'язку в вихідний сигнал. Біорозпізнавальний елемент іммобілізується на поверхні металевої плівки, яка підтримує поверхневі плазмони. Молекули аналіту в рідкій пробі при взаємодії з ППР датчиком зв'язуються біорозпізнавальними елементами і спричиняють зростання показника заломлення на поверхні датчика, яке вимірюється з допомогою оптичних методів.

Зміна показника заломлення, яка спричинена захопленням біомолекулами молекул аналіту, залежить від концентрації молекул аналіту на поверхні датчика і від характеристик цих молекул. Якщо зв'язок відбувається з тонким шаром на поверхні датчика товщини h , то відгук датчика є пропорційним індукованій зв'язками змінами показника заломлення, яка може бути виражена як

$$\Delta n = \left(\frac{dn}{dc} \right) \frac{\Gamma}{h} \quad (2.1)$$

де dn/dc – позначає приріст показника заломлення молекул аналіту (зазвичай 0,1 – 0,3 мл/г) і Γ – означає поверхневу концентрацію в одиницях [маса/площа].

Найважливішими характеристиками ППР датчиків є чутливість, лінійність, роздільна здатність, точність, повторюваність, динамічний діапазон, і межі вимірювання.

Чутливість датчика – це відношення зміни сигналу на виході датчика до зміни величини, яка вимірюється (наприклад концентрації аналіту).

					МП.171.081.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум. докум.	Підпис	Дата		34

Чутливість ППР біодатчиків визначається двома факторами – чутливістю виходу датчика (наприклад резонансним кутом чи довжиною хвилі) щодо показника заломлення і ефективністю перетворення зв'язку в зміни показника заломлення. Чутливість ППР датчика щодо показника заломлення S_{RI} може бути виражена як добуток двох членів

$$S_{RI} = \frac{\delta Y}{\delta n_{ef}} \frac{\delta n_{ef}}{\delta n_d} = S_{RI1} S_{RI2} \quad (2.2)$$

де Y – означає вихід датчика. Перший член описує чутливість виходу датчика як ефективний індекс поверхневих плазмонів і залежить від методу збудження поверхневих плазмонів і використання способу модуляції. Другий член описує чутливість як ефективний індекс поверхневих плазмонів щодо показника заломлення і не залежить від методу модуляції і методу збудження.

В загальному, чутливість ефективного індексу поверхневих плазмонів для показника заломлення залежить від розподілу змін показника заломлення. Використовуючи теорію збурень для обчислення чутливості ефективного індексу до показника заломлення для двох граничних випадків: зміни в показнику заломлення що відбуваються в цілому об'ємі проби і зміни показника заломлення, які відбуваються лише на дуже малій відстані від поверхні датчика. Показано, що чутливість ефективного індексу поверхневих плазмонів до зміни показника заломлення в об'ємі може бути виражене як

$$\left(\frac{\delta n_{ef}}{\delta n_d} \right)_B = \frac{\delta n_{ef}^3}{\delta n_d^3} > 1$$

і тому є завжди більшим ніж чутливість вільного простору плоских хвиль в нескінченному діелектричному середовищі, яка є рівною 1.

В ППР датчику з модуляцією інтенсивності, виходом датчика є інтенсивність (яка є пропорційною коефіцієнту відбивання в призмі) і тому інструментальний внесок в чутливість датчика S_{RI1} може бути записана як $\delta R / \delta n_{ef}$, де R – коефіцієнт відбивання. Для того, щоби отримати аналітичний вираз для інструментального вкладу в чутливість датчика, коефіцієнт відбивання потрібно взяти таким, як впливає із наближення Лоренца:

$$R = 1 - \frac{4\gamma_i\gamma_{rad}}{\Delta_{ef}^2 + (\gamma_i + \gamma_{rad})^2} \quad (2.3)$$

де γ_i і γ_{rad} описують коефіцієнт затухання поверхневих плазмонів із-за абсорбції і випромінювання і для призматичного зв'язку $\Delta_{ef} = n_p \sin \theta - n_{ef}$. Використовуючи рівняння (2.3) чутливість відбивання до ефективного показника заломлення може бути описана так:

$$\frac{\partial R}{\partial n_{ef}} = \frac{-8\gamma_i\gamma_{rad}}{[\Delta_{ef}^2 + (\gamma_i + \gamma_{rad})^2]^2} \quad (2.4)$$

Показано, що максимальна крутизна для відбивання може спостерігатися тоді, коли

$$\Delta_{ef} = \pm \frac{(\gamma_i + \gamma_{rad})}{\sqrt{3}} \quad (2.5)$$

і максимальний тангенс кута нахилу отримаємо тоді, коли

$$\gamma_{rad} = \gamma_i / 2 \quad (2.6)$$

					МРП.171.081.001	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум. докум.	Підпис	Дата		

Ця умова знижує глибину резонансного мінімуму, але зменшення його ширини призводить до зростання в нахилі кривої відбивання. З цих умов, максимум інструментального вкладу в чутливість може бути описаний як:

$$\frac{\partial R}{\partial n_{ef}} = \left(\frac{\partial R}{\partial n_{ef}} \right)_{max} = \frac{2\sqrt{3}}{9\gamma_i} \quad (2.7)$$

2.2. Розрахунок товщини золотої плівки

На межі поділу метал/діелектрик поверхневі плазмонні хвилі збуджуються, а для їх збудження використовуються призма з діелектричною проникністю ϵ_p . Використовуючи теорію Френеля для обчислення коефіцієнту відбивання і умову (2.7), виберемо оптимальну товщину для металевої плівки.

Коефіцієнт відбивання для структури, зображеної на рис. 2.1. описується формулою

$$R = |r_{pmd}|^2 = \left| \frac{r_{pm} + r_{md}e^{2ik_{mx}q}}{1 + r_{pm}r_{md}e^{2ik_{mx}q}} \right|^2 \quad (2.8)$$

де

$$k_{ix} = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \epsilon_i - k_z^2} \quad (2.9)$$

$$r_{ji} = \frac{\epsilon_i k_j - \epsilon_j k_i}{\epsilon_i k_j + \epsilon_j k_i} \quad (2.10)$$

$$k_z = k_{x0} \sqrt{\epsilon_p} \sin \theta \quad (2.11)$$

					МРП.171.081.001	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум. докум.	Підпис	Дата		

Так як ми будемо використовувати як джерело світла лазерний діод з довжиною хвилі 650 нм, то за значення діелектричної функції золота приймемо вираз $\epsilon_m = -13,1 + i1,08$. Діелектрична стала призми $\epsilon_p = 1.4568$. А за буферний розчин приймемо воду з діелектричною сталою $\epsilon_d = 1.33$.

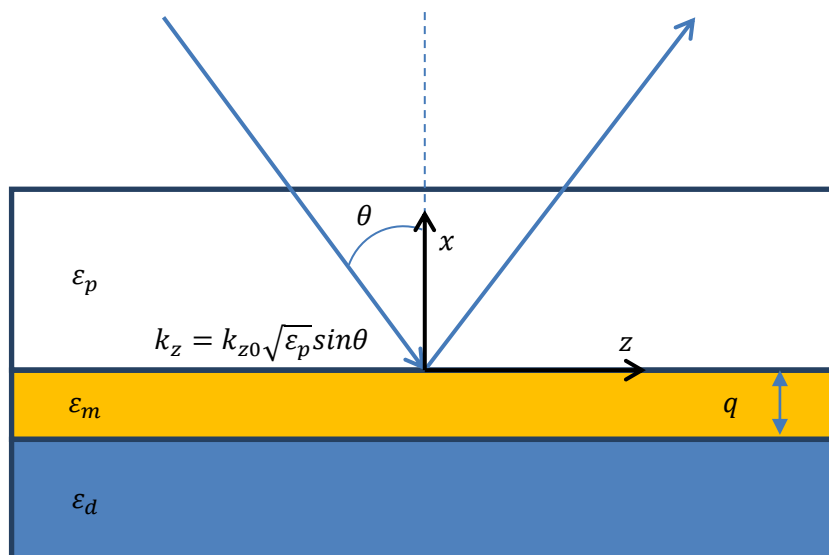


Рис. 2.1. Геометрія задачі для обчислення коефіцієнту відбивання.

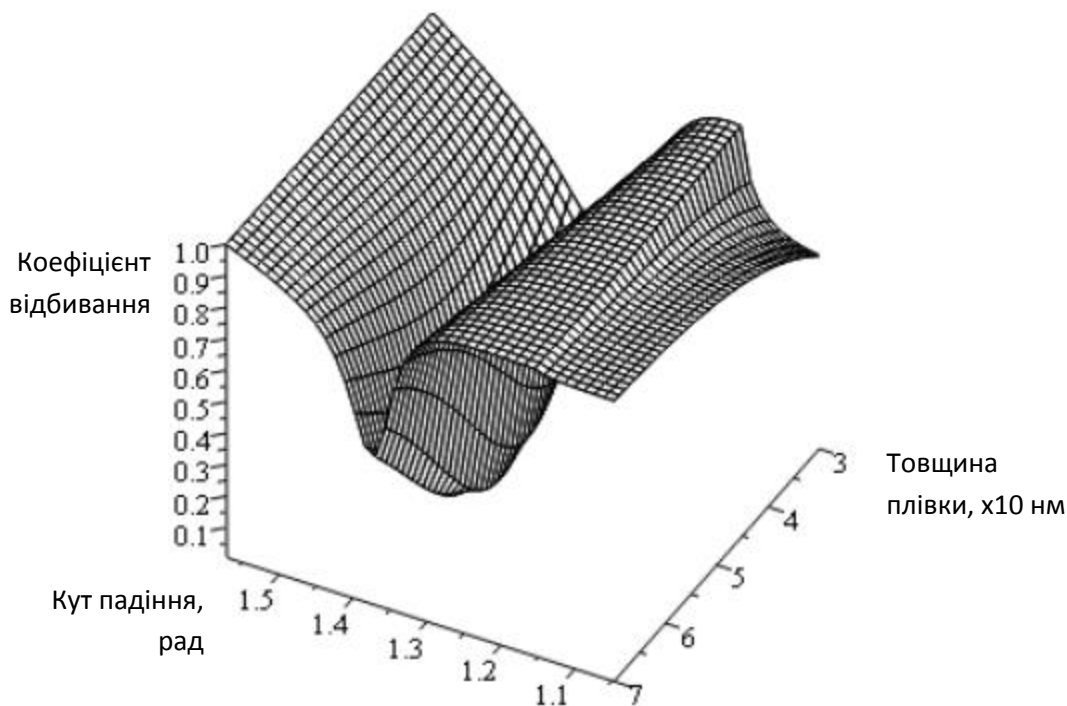


Рис. 2.2. Залежність коефіцієнту відбивання від кута падіння і товщини плівки.

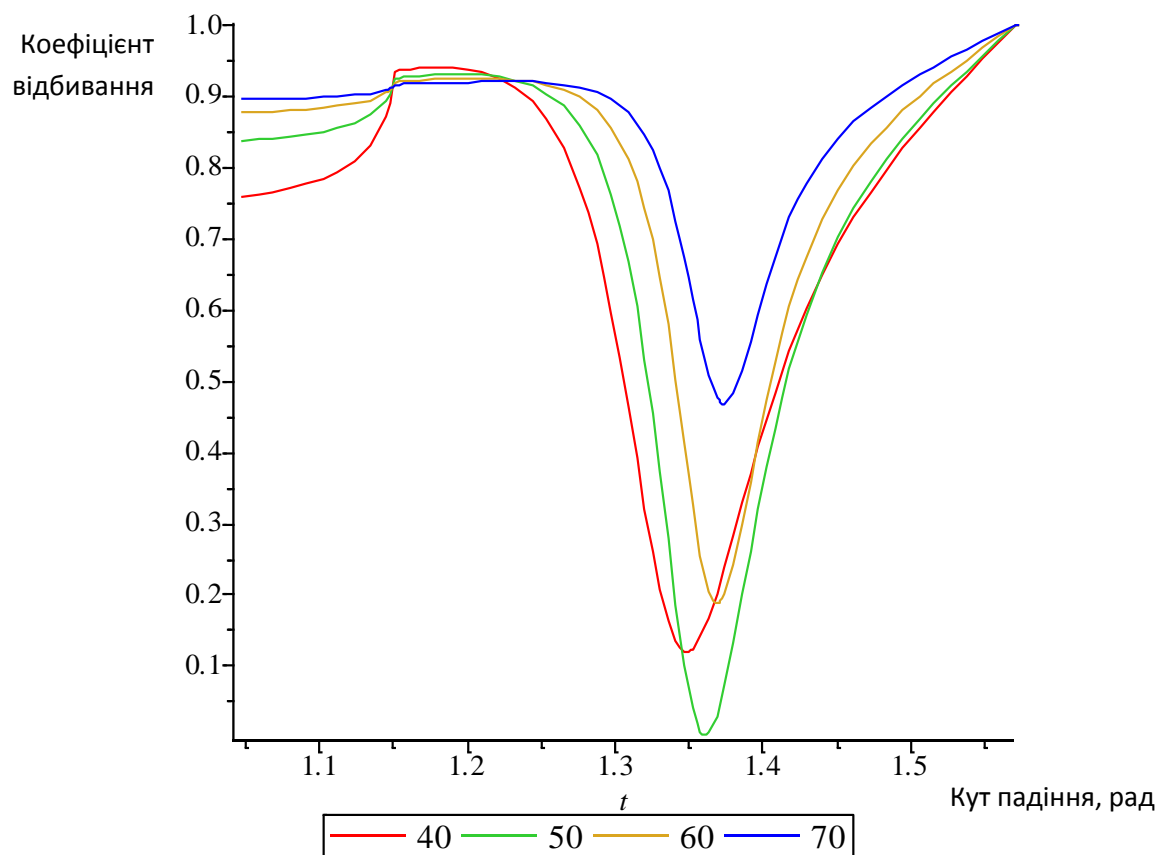


Рис. 2.3. Залежність коефіцієнту відбивання від кута для різних значень товщини металевої плівки

Як бачимо, з розрахованих значень для товщини золотої плівки, найкращим є значення 50 нм, так як при такій товщині забезпечується ідеальне спостереження явища поверхневого плазмонного резонансу.

2.3. Структурна схема вимірювального елемента

У першій частині даної роботи було розглянуто фізику поверхневих плазмонних коливань та показано наскільки широкими є межі їх використання в різних областях науки та вимірювальної техніки. Для розробки вимірювального приладу, принцип дії якого базується на явищі поверхневого плазмонного резонансу, складемо структурну схему в якій поєднаємо усі елементи, які необхідні для надійного функціонування приладу.

З усіх можливих варіантів побудови виберемо той, в основі якого лежить розпізнавальний елемент з геометрією Кретчмана. Вибір цієї геометрії ґрунтується на тому, що вона є значно простішою в реалізації ніж геометрія Отто і до того ж, нам потрібно, щоби речовини, характеристики яких будуть вимірюватися, контактували з поверхнею датчика.

Вимірювати сигнал поверхневого плазмонного резонансу можна багатьма методами. Багато з них вимагають доволі дорогих елементів або вимагають побудови цілого вимірювального комплексу (наприклад у випадку вимірювання сигналу ППР з допомогою модуляції довжини хвилі відбитого світла потрібно побудувати спектрометр). Але для того, щоби забезпечити відносну простоту схеми вимірювання, потрібно вибрати таку конструкцію, яка не буде містити дуже громіздких надбудов. Задані вимоги задовольняє метод вимірювання з модуляцією інтенсивності відбитого світла.

Використання даного методу дещо спрощує схему вимірювання, але вимагає побудови поворотної платформи, яка дозволить вимірювати інтенсивність відбитого світла при різних кутах його падіння. Структурну схему пристрою наведено на рис. 2.4.

					МП.171.081.001	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум. докум.	Підпис	Дата		

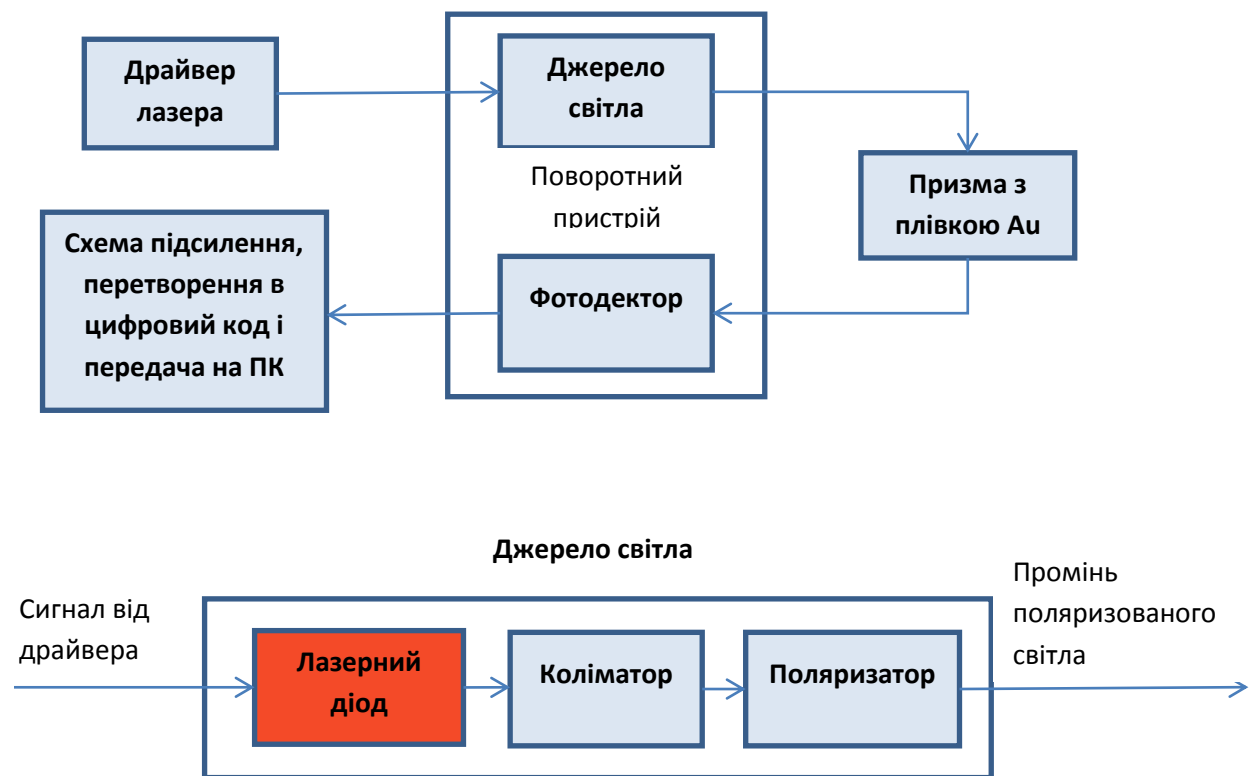


Рис. 2.4. Структурна схема вимірювального приладу

Маючи основу для побудови вимірювального приладу виконаємо розрахунок для її основних елементів. Список елементів є таким:

- призма з нанесеним тонким шаром золота (товщина 50 нм);
- джерело монохроматичного світла, яке включає в себе лазерний діод, коліматор та поляризатор;
- фотодетектор;
- драйвер лазерного діода;
- поворотна платформа;
- джерело живлення.

2.3.1. Призма

Елемент, який займає одне з найважливіших місць вимірювального приладу, що розробляється, є призма з нанесеним шаром золота на одну із її бічних граней. Від якості матеріалу призми та від якості її поверхонь в значній мірі залежать результати усіх вимірювань, які будуть проводитися.

Тому, враховуючи важливість правильного вибору призми, яка буде володіти потрібними оптичними характеристиками, доцільно буде виготовити її із кварцового скла, яке володіє потрібними оптичними характеристиками.

Показник заломлення кварцового скла, в залежності від довжини хвилі, наведено в таблиці 2.1. Так як в приладі буде використано лазер з довжиною хвилі 650 нм, то показник заломлення призми буде в даному випадку рівним 1,4568.

Таблиця 2.1. Показник заломлення кварцового скла

λ , мкм	0,34	0,44	0,54	0,64
n	1,47877	1,4664229	1,460406	1,456868

Кварцове скло володіє унікальною спектральною прозорістю. Скло марки КИ володіє оптичною прозорістю в видимій і інфрачервоній області спектру і не має помітної смуги поглинання в інтервалі довжин хвиль 2600 нм – 2800 нм.

Кварцове скло володіє високою механічною міцністю в широкому діапазоні температур. Таке скло не є гігроскопічним, стійке до впливу води і кислот (крім фосфорної і плавикової).

На одну з граней призми наноситься тонкий шар золота (порядку 50 нм), технологія нанесення якого буде розглянуто нижче.

Знаючи усі необхідні характеристики кварцового скла підберемо потрібні розміри призми та виконаємо обчислення для шляху лазерного променя.

					МП.171.081.001	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум. докум.	Підпис	Дата		

Кут повного відбивання для променя, який падає на верхню сторону призми

$$\alpha = \arcsin \frac{1}{n} = \arcsin \frac{1}{1,4568} = 43,60^{\circ}$$

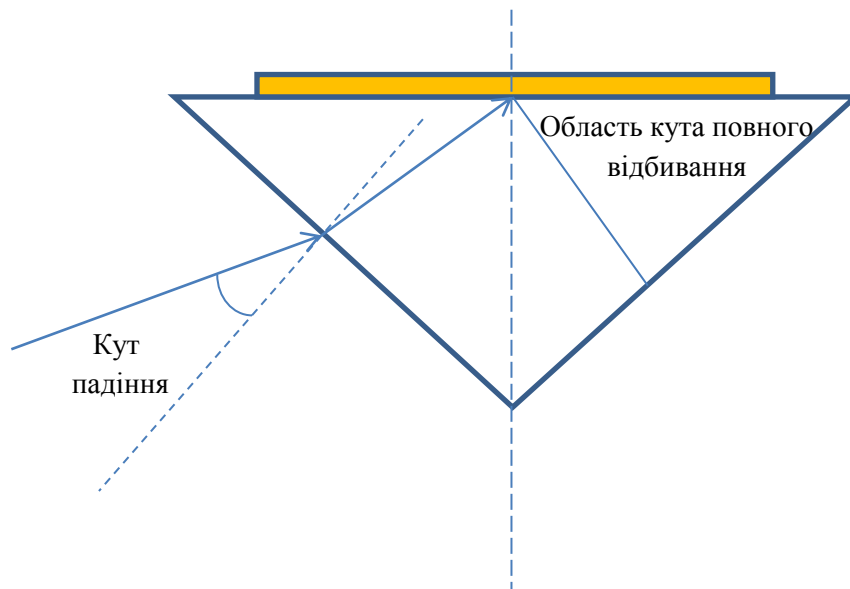


Рис. 2.5. Шлях лазерного променя через призму

2.3.2. Лазерний діод

Лазерний діод ADL-65055GA2 компанії Laser Components з довжиною хвилі випромінювання 650 нм використовуємо в якості джерела світла. Потужність такого лазера 5 мВт в неперервному режимі роботи.

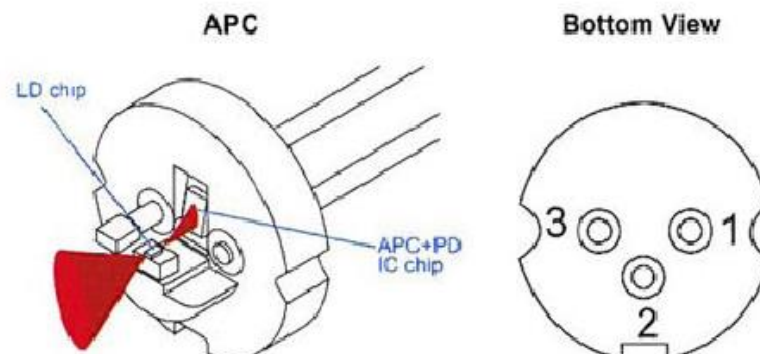


Рис. 2.6. Лазерний діод ADL-65055GA2

					МП.171.081.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	докум.	Підпис	Дата	43

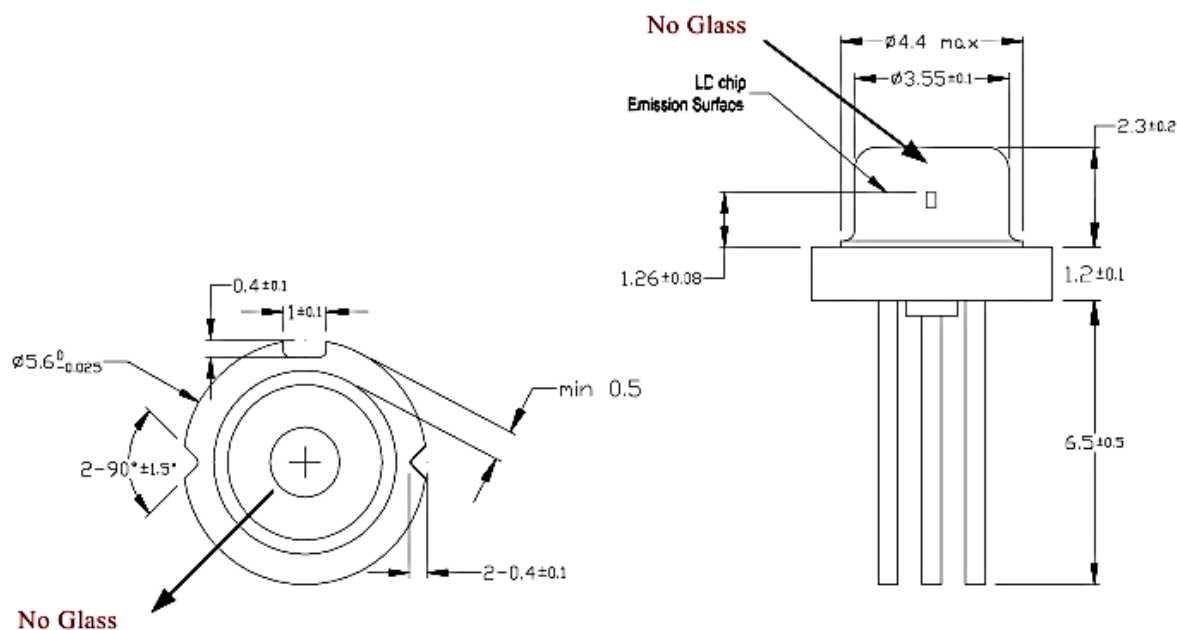


Рис. 2.7. Геометрія лазерного діода

2.3.3. Драйвер лазера

Для живлення лазера потрібно використати таке джерело, яке максимально забезпечить стабільність параметрів живлення. Адже від того наскільки стабільним буде живлення лазерного діода, настільки стабільним будуть і характеристики його променя.

Для лазерних модулів з низькою потужністю можна використовувати лазерні драйвери виконані як в дискретному виконанні так і в інтегрованому. Але порівнюючи можливості сучасних інтегральних драйверів та тих, які виготовлені з дискретних компонентів, можна сказати, що інтегральні мають цілий ряд переваг: більш високу стабільність живлення, займають менше місце на друкованих платах, мають стабілізацію температурних режимів та значно більшу швидкість включення.

А так як нам для розробки потрібний лазерний драйвер який максимально забезпечить високо стабільну роботу лазерного діода, то доцільно буде використати інтегральний лазерний драйвер. Так як лазерний

діод ми вибрали компанії Laser Components, там же візьмемо і драйвер лазерного діода.

Драйвер iC-WKN призначений для роботи в неперервному режимі з струмами лазерних діодів до 300 мА і потребує лише чотири зовнішніх компоненти. Цей драйвер може забезпечити захист від руйнування від електростатичного розряду і захист від надмірного зростання температури і струму. Фільтр, який інтегрований в даний драйвер, також може забезпечити захист діода при перехідних режимах. Напруга живлення драйвера 2,4 – 15 В, експлуатаційна температура -40 – 80 °С.

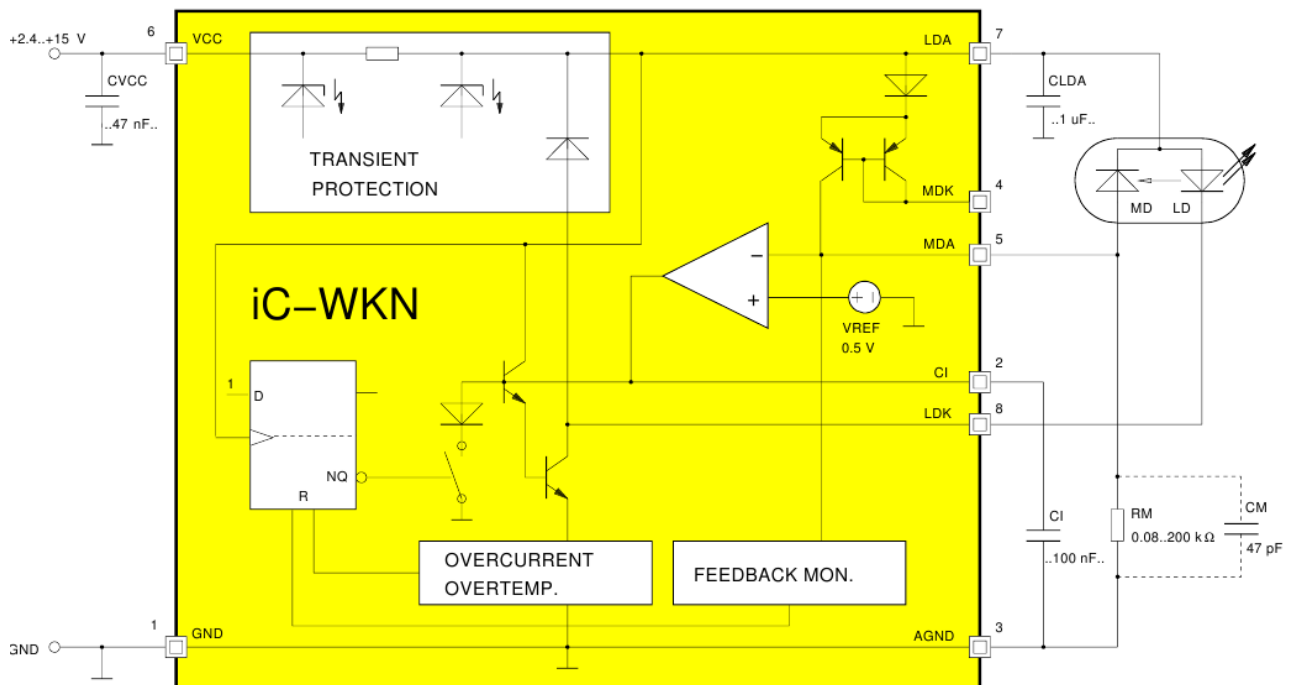


Рис. 2.8. Блок-діаграма драйвера iC-WKN

2.3.4. Лінза-коліматор

Коліматор використовується для того, щоби промінь світла, який випромінює лазерний діод був строго паралельним. У нашому випадку коліматором буде лінза САУ033, характеристики якої наведено в таблиці. Це спеціальна асферична лінза виготовлена з пластику і призначена для роботи в поєднанні з лазерним діодом. Дана лінза буде монтуватися з допомогою

[illegible]

Матеріал, з якого виготовлену дану лінзу, забезпечує проходження світла на 95%. Так як дана лінза розміщена буде над покривним склом лазерного діода, то відстань до джерела буде 0,55 мм. З наведених параметрів лінзи-коліматора можна розрахувати параметри лазерного пучка, який буде падати на поверхню поляризатора.

Таблиця 2.2. Характеристики лінзи СAУ033

Апертура	2,7 мм
Фокальна відстань	3,3 мм
Задня фокальна відстань (з 0,25 мм лазерного скла)	1,98 мм

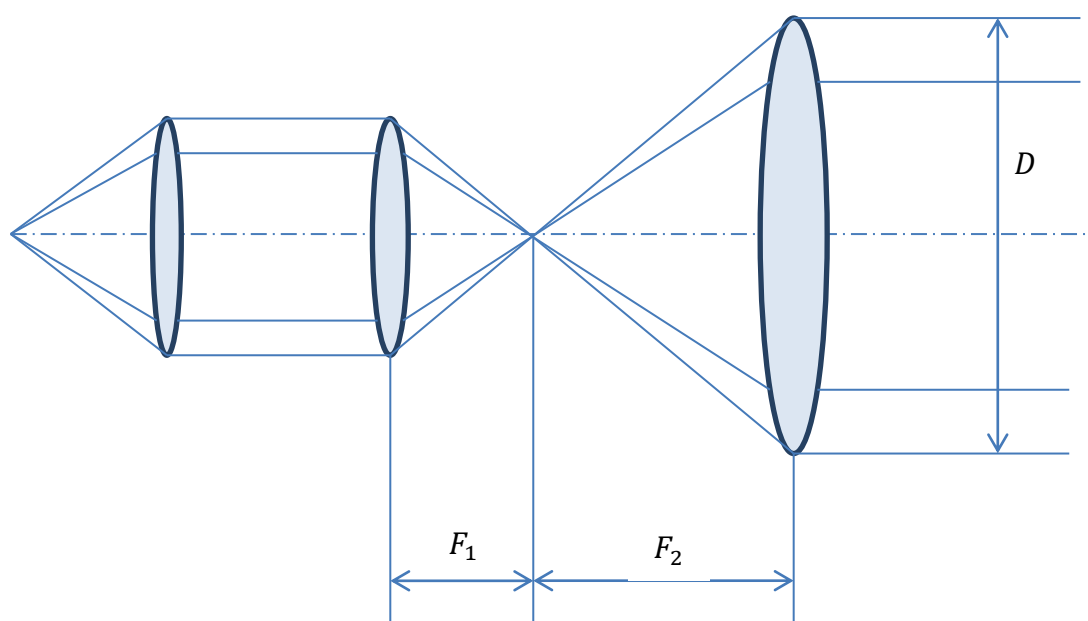


Рис. 2.9. Оптична схема для отримання широкого лазерного пучка

2.3.5. Поляризатор

Так як лазерне випромінювання складається як із s-хвиль так і з р-хвиль, то для того, щоби отримати чітку картину поверхневого плазмонного резонансу, нам потрібно відділити р-хвилі від s-хвиль. Для цього використаємо поляризатор Глана-Томсона.

В призмі Глана-Томсона оптичні осі в поляризаційній і компенсаторній половинах лежать в площині падіння світла на гіпотенузу грань. Половини

розділені шаром клею, який дещо зменшує спектральну прозорість в ультрафіолетовій частині спектру, яка для нас не є суттєвою. Призма виготовляється із ісландського шпату I сорту.

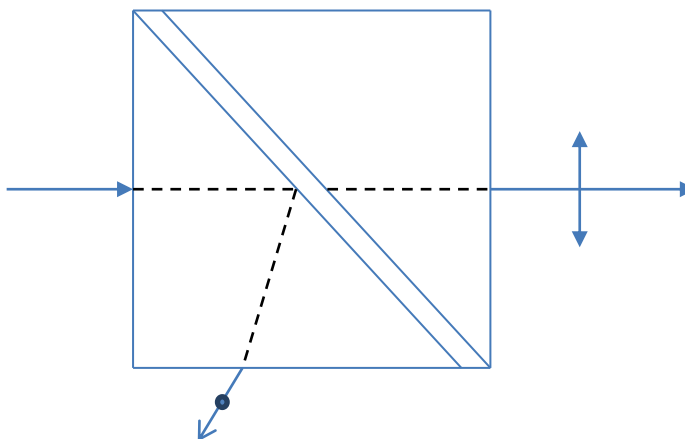


Рис. 2.10. Поляризатор Глана-Томсона

Так як робочим є р-промінь, в даному випадку це буде незвичайний промінь, то це дозволяє суттєво зменшити втрати із-за френелівських відбивань від гіпотенузних граней за рахунок близькості кута падіння до кута Брюстера.

Такі призми виготовляються із від'ємних подвійних променезаломлюючих кристалів. Так як робочим є р-промінь, то s-промінь зазнає повного внутрішнього відбиття від гіпотенузової грані першої половини призми і поглинається на чорних бокових поверхнях.

2.3.6. Фотодетектор

Для того, щоби спостерігати явище поверхневого плазмонного резонансу потрібно якимось чином детектувати випромінювання, яке відбивається від поверхні металевої плівки. Існує дуже багато різноманітних пристроїв, з допомогою яких це можна зробити. Але так як ми маємо певні параметри випромінювання, з допомогою якого збуджуються плазмонні

коливання, то фотодетектор доцільно підібрати таким чином, щоби можна було максимально точно вимірювати усі зміни в вихідному сигналі.

Поверхневі плазмонні коливання збуджуються з допомогою світлових хвиль, які мають довжину хвилі рівну 635 нм. На рис. наведено спектри поглинання різних напівпровідникових матеріалів в діапазоні оптичного випромінювання.

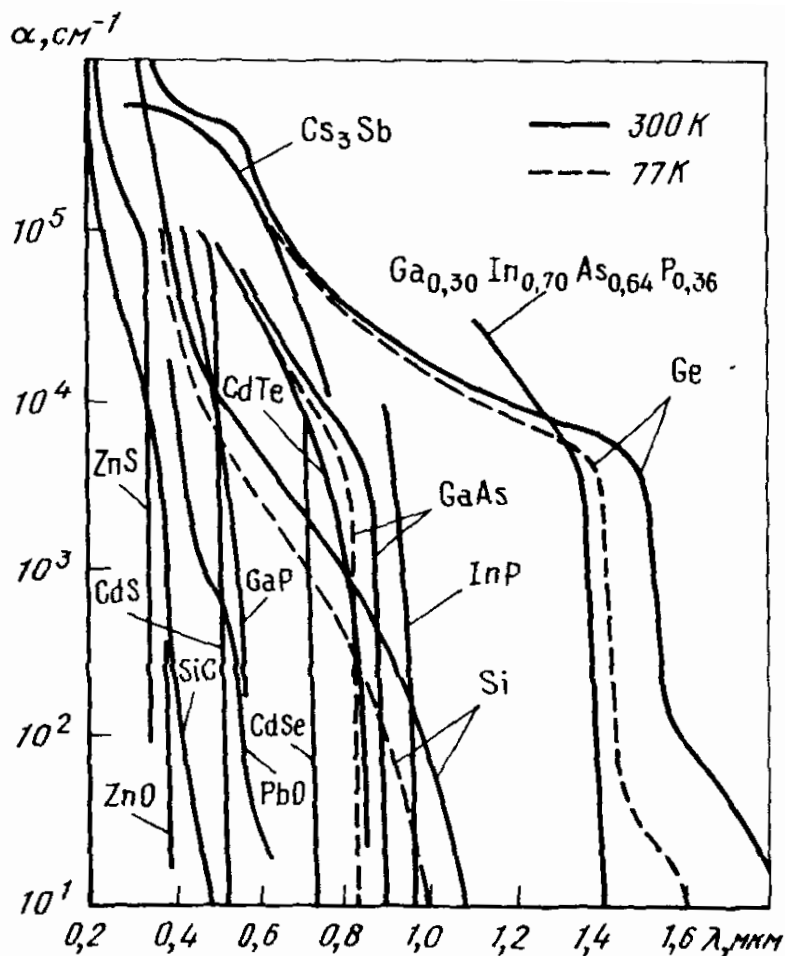


Рис. 2.11. Спектри поглинання різних напівпровідникових матеріалів в діапазоні 0,2 – 0,8 мкм оптичного спектру.

Як видно, для випромінювання з довжиною хвилі 635 нм найбільш підходять фотоприймачі виготовлені на основі кремнію. А на рис. показано спектральну характеристику квантової ефективності фотодіодів, які виготовлені з різних напівпровідникових матеріалів. Як видно, знову ж,

кремнієві фотодіоди – найкраще рішення, так як в даному діапазоні довжин хвиль вони володіють фактично 100% квантовою ефективністю.

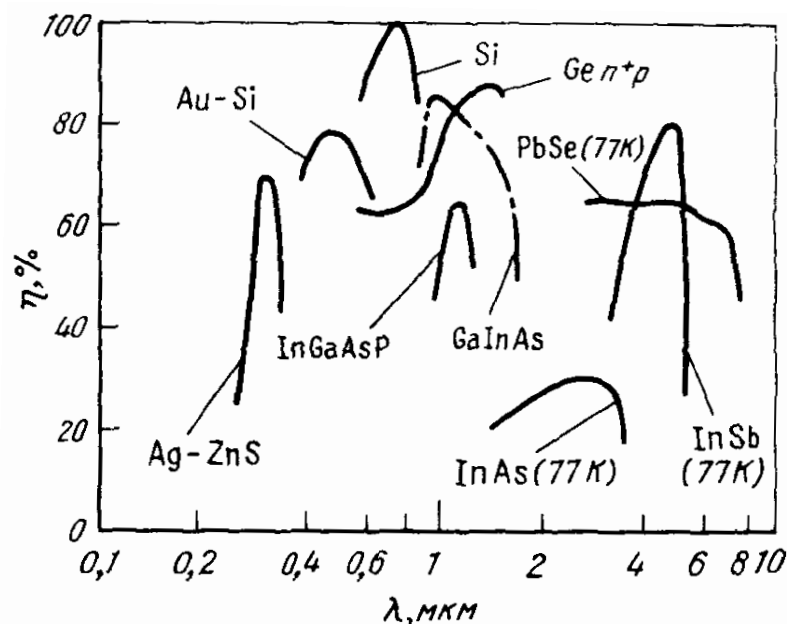


Рис. 2.12. Спектральні характеристики квантової ефективності фотодіодів, які виготовлені із різних напівпровідникових матеріалів [1].

Для побудови даного приладу використаємо кремнієвий лавинний фотодіод SAE500VS компанії Laser Components. Це є епітаксіальний фотодіод призначений для роботи в діапазоні довжин хвиль від 400 до 1000 нм і має високу чутливість. Особливістю даного фотодіода є те, що максимум його спектральної чутливості падає на випромінювання з довжинами хвиль 650 нм, що є ідеальним в нашому випадку.

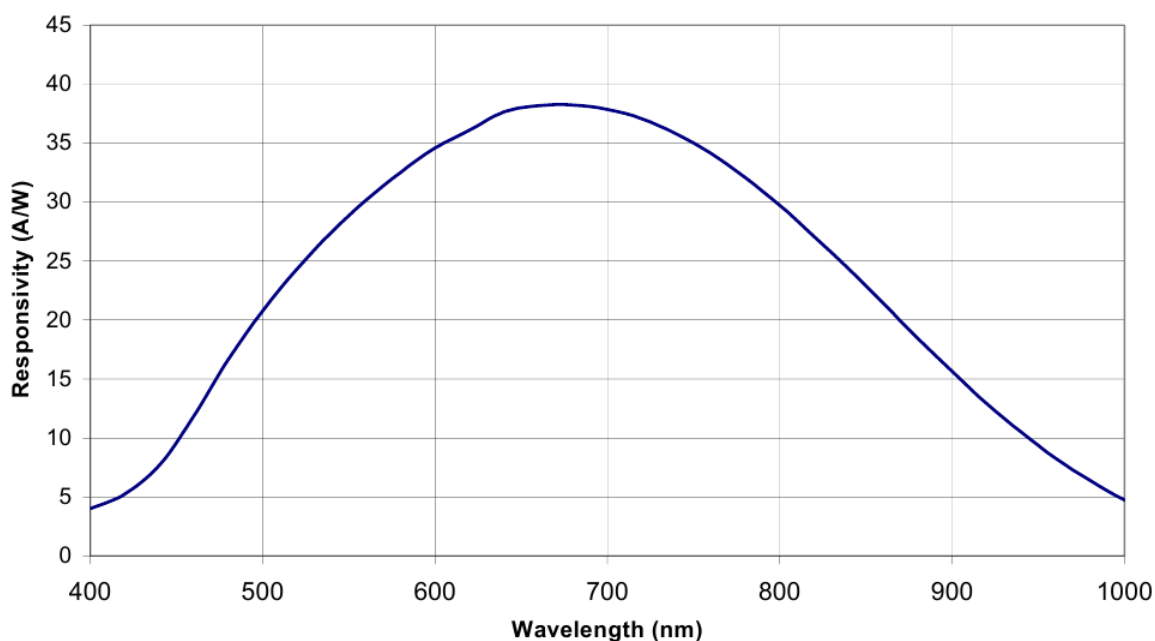


Рис. 2.13. Спектральна чутливість фотодіода

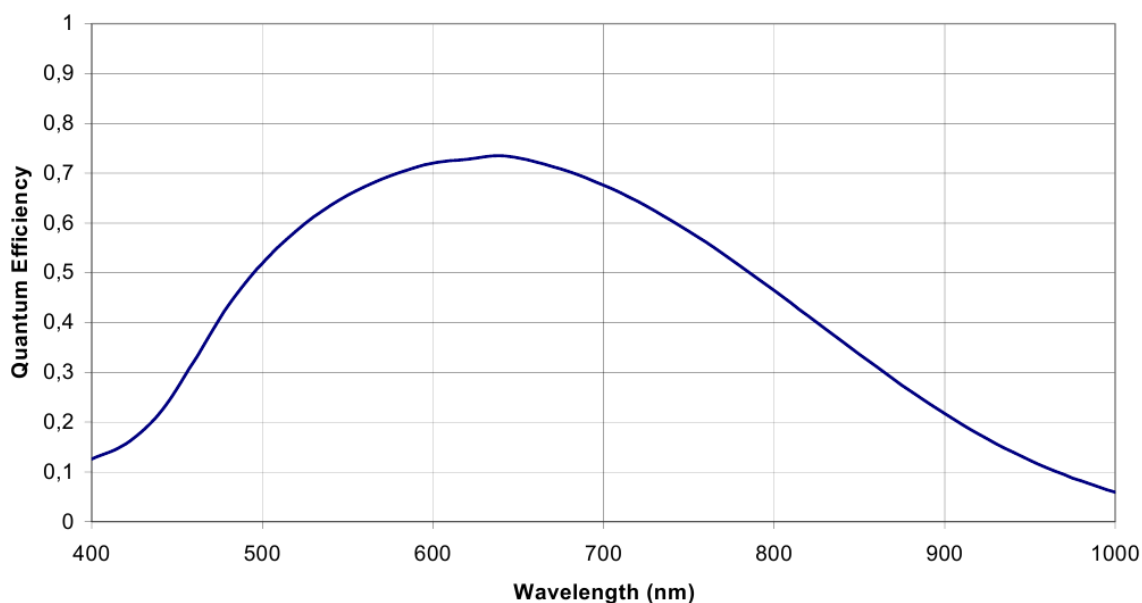


Рис. 2.14. Квантова ефективність фотодіода

2.4. Висновок

Виходячи з умов для збудження поверхневих плазмонних хвиль розраховано основні параметри системи. Товщина золотої плівки – 50 нм для випромінювання з довжиною хвилі 650 нм. Чутливість фотодіода максимально підібрана до цієї довжини хвилі.

3. КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1. Друкована плата вимірювального модуля

3.1.1. Розробка конструкції друкованої плати вимірювального модуля

Передавання даних на комп'ютер здійснює вимірювальний модуль, який є одним з найважливіших елементів датчика, який розробляється. Модуль призначений для вимірювання величини потоку світла, відбитого від призми, і для передачі даних на комп'ютер. Для того, щоб мати можливість точно вимірювати зміну показника заломлення середовища, потрібно забезпечити точне перетворення величини потоку світла в електричний сигнал, який можна аналізувати за допомогою різних програмних засобів.

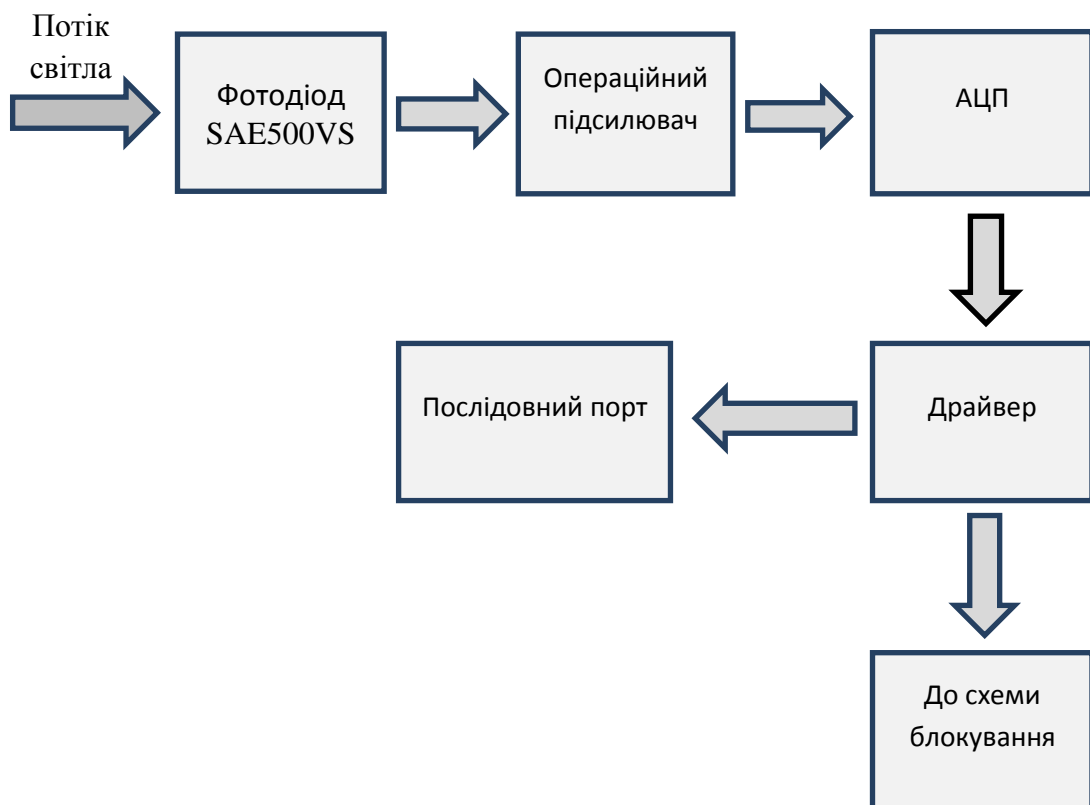


Рис. 3.1. Блок-схема роботи вимірювального модуля

Фотодіод SAE500VS, який використовується для вимірювання величини потоку світла, має темновий струм величиною 10 нА і струм шумів 0,6 пА.

Для забезпечення приглушення різноманітних шумів використаємо схему підключення фотодіода до двох перетворювачів струму в напругу, виходи яких з'єднані з входами диференційного підсилювача INA105 (рис. 3.2). Струм фотодіода буде протікати через два однакових опори, на яких буде діяти однаковий електростатичний шумовий зв'язок. Струм діода створить диференціальний сигнал на опорах, а шумовий сигнал генерує синфазний сигнал. При проходженні через INA105 ці сигнали розділяються: сигнал діода проходить на вихід, а шумовий сигнал приглушується.

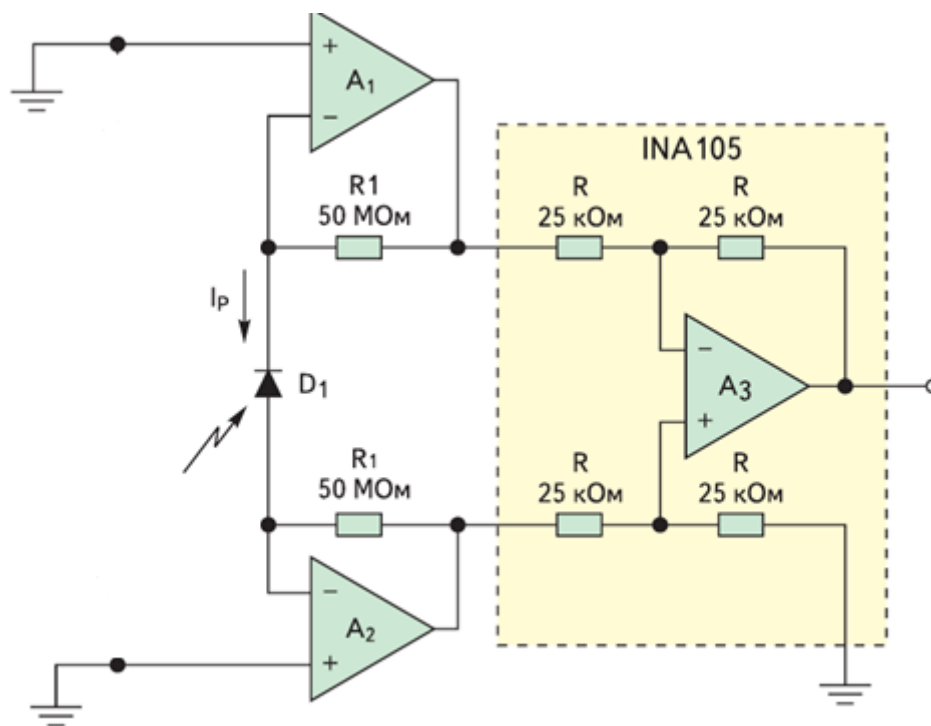


Рис. 3.2. Підсилювач з диференціальними входами, який має широкую смугу КОСС і підсилення

Неінвертувальні входи двох перетворювачів струму в напругу заземлені, тому на двох входах діода встановлюється нульова напруга. Окрім того, в такій схемі виключається появлення сигналу на синфазних входних

ємностях, тому збільшується смуга підсилювання сигналу і приглушення електростатичних перешкод.

Для подальшої обробки сигналу його слід перетворити в цифрову форму і подати на послідовний порт комп'ютера. Для цього використаємо АЦП MCP3201 розрядністю 12 біт і драйвер MAX232 для подачі сигналу на COM-порт комп'ютера. Дану частину схеми наведено на рис. 3.3.

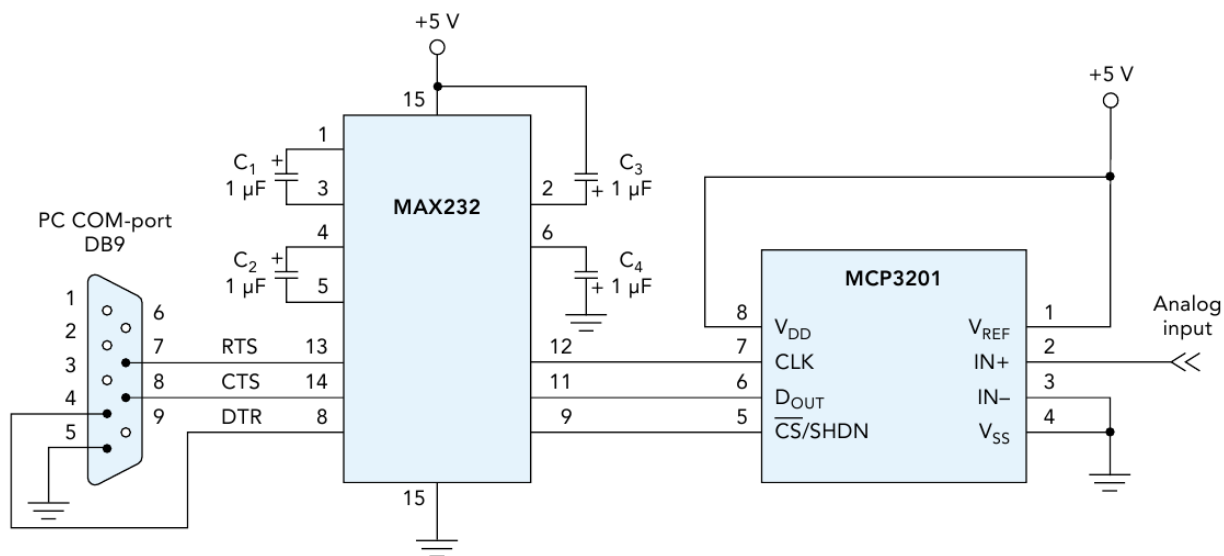


Рис. 3.3. Подача сигналу на COM-порт комп'ютера

Конструкцію друкованої плати для принципової електричної схеми, зображеної на рис. 3.4, виконаємо з врахуванням того, щоби передбачити місце і кріплення для фокусуючої лінзи фотодіода. Конструкцію даної плати будемо розробляти в САПР OrCAD.

Друкована плата – це ізоляційна плата обмеженого розміру з нанесеними на неї методом друкованого монтажу провідниками електричного струму і контактними площадками, які призначені для з'єднання навісних електронних елементів, а також металізованими (перехідними) і не металізованими (кріпильними) отворами. В якості матеріалу для друкованих плат використовують гетинакс, текстоліт, склотекстоліт та ін..

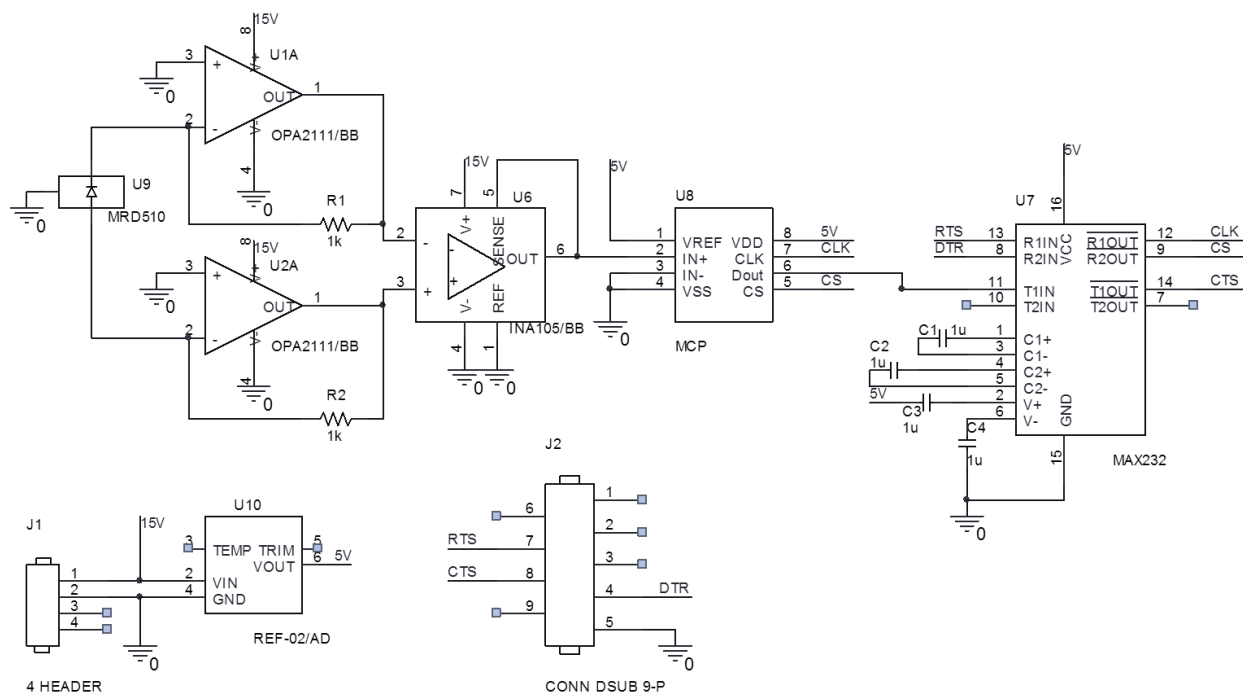


Рис. 3.4. Електрична схема вимірювального модуля

Принципову електричну схему, на основі якої розробляється друкована плата, наведено на рис. 3.4. Перелік елементів даної схеми наведено в специфікації.

3.1.2. Розрахунок конструкції друкованої плати

Основні вимоги до електричних параметрів друкованих плат сформульовані в ГОСТ 23751 – 68. Для виготовлення плати виберемо хімічний метод. Плата, яка розробляється, є двосторонньою.

Максимальний струм, який буде протікати по схемі. Це буде струм операційного підсилювача INA105, який на виході може видавати до 20 мА. Виходячи з цього значення проведемо мінімальний розрахунок для прийняття числових значень провідника, відстані між провідниками і розміру контактної площадки. Струм, який протікає в платі, можна знайти за формулою

$$\frac{I}{t \cdot h_{\phi}} \leq \Delta I,$$

де ΔI – щільність електричного струму в друкованому провіднику, яка не повинна перевищувати $20 \cdot 10^6$ А/м²; h_{ϕ} – товщина фольги, мм; t – ширина провідника, мм. Прийmemo за мінімальне значення товщини фольги $h_{\phi} = 20$ мкм. Тоді ширина провідника матиме значення:

$$t \geq \frac{20 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^6 \cdot 20 \cdot 10^{-6}} = 0.05 \text{ мм.}$$

Якщо прийняти п'ятий клас точності, то ширина провідника повинна бути не менше 0,1 мм, відстань між провідниками – не менше 0,1 мм, гарантійний поясok більше 0,025 мм. Однак для виготовлення плат четвертого і п'ятого класів потрібно спеціалізоване обладнання, спеціальні матеріали, ідеальна чистота в виробничих приміщеннях. Але зупинимося на третьому класі точності, тому що масовий випуск плат третього класу точності освоєний основною масою вітчизняних підприємств.

Отримане значення ширини провідників і відстані між ними входить в рамки прийнятої ширини. Прийmemo ширину провідників і відстань між ними рівним 0,25 мм.

Вибір розмірів отворів пов'язаний з товщиною плати. Діаметр отворів розрахуємо по формулі: $d = d_{\text{вив}} + 0,2$ мм. Діаметри виводів елементів схеми ріні: $d = 0,51 + 0,2 = 0,71$ мм (усі мікросхеми типу DIP).

При розведенні схеми потрібно намагатися зробити довжину провідників якомога меншою, так як використання складних форм провідників призводить до паразитної індуктивності та ємності. При ширині провідника рівній 0,25 мм і відстані між провідниками також 0,25 мм паразитну ємність на 10 мм довжини провідника можна розрахувати згідно формули:

$$C_{\text{п}} = \frac{0,12 \cdot \varepsilon \cdot l}{\lg \left(\frac{2S}{t + h_{\phi}} \right)},$$

					МРП.171.081.001	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум. докум.	Підпис	Дата		

де $\varepsilon = 0,5 \cdot (1 + \varepsilon_{\text{осн}})$ – діелектрична проникність. Для текстоліту $\varepsilon_{\text{осн}} = 8$ нФ/см. Підставляючи значення отримаємо:

$$C_{\text{п}} = \frac{0,12 \cdot 0,5 \cdot (1 + 8) \cdot 1}{0,268} = 2,0 \text{ пФ.}$$

Паразитна взаємоіндукція між друкованими провідниками для плати без екранувальної пластини характеризується коефіцієнтом взаємоіндукції і знаходиться за формулою:

$$M = 2 \cdot l \cdot \left(\ln \frac{2l}{S + t} - 1 \right), \text{ нГ.}$$

Ця формула є справедливою для паралельних провідників однакової товщини. Підставивши числові значення отримаємо:

$$M = 2 \cdot l \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot 10}{0,25 + 0,25} - 1 \right) = 1,2 \text{ нГ.}$$

Точність обчислення за цією формулою складає $\pm(20 \dots 30)\%$, що сповна достатньо для практики. Результат розведення плати наведено на рис. 3.5. і рис. 3.6. Розмір плати 10х6 см.

					МРП.171.081.001	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум. докум.	Підпис	Дата		

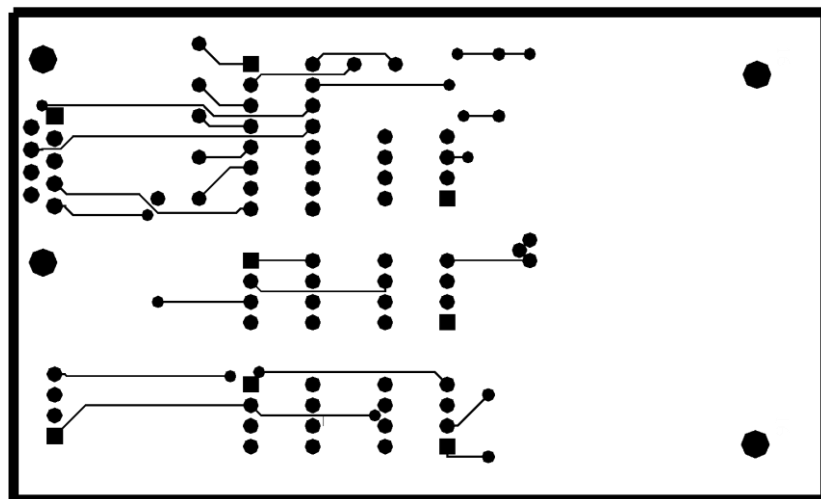


Рис. 3.5. Вигляд плати знизу

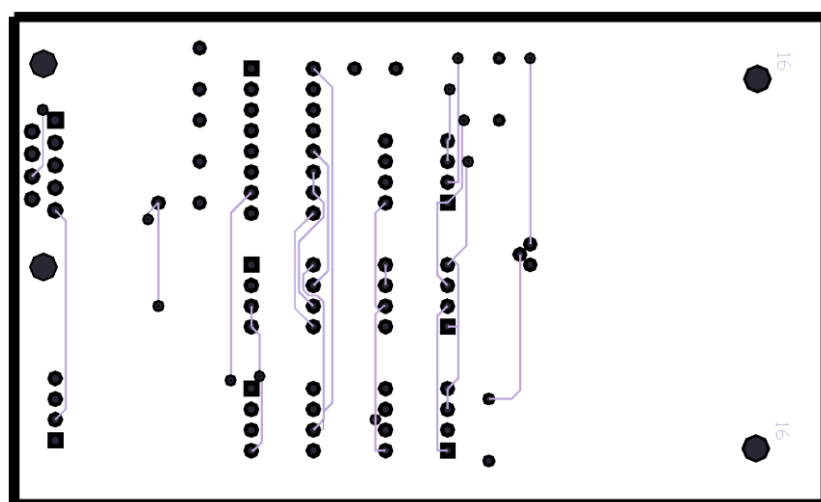


Рис. 3.6. Вигляд плати зверху

3.2. Висновок

В даній частині розроблено загальну структурну схему біосенсора на поверхневому плазмовому резонансі. Показано можливість його використання в лабораторних умовах для вимірювання показника заломлення діелектричного середовища.

Також було розроблено електричну схему вимірювального модуля, основним призначенням якої є підсилення сигналу фотодіода з одночасним подавлюванням сторонніх шумів (це досягається використанням схеми на диференційному підсилювачі) та перетворення його в цифрову форму з наступною подачею його на COM порт комп'ютера.

Розроблена схема має розміри 100х60 мм і окрім того, що містить на собі усі необхідні компоненти електричної схеми, має місце і для кріплення безпосередньо перед фотодіодом системи фокусування лазерного променя. Така конструкція забезпечує компактність вимірювального модуля та зручність його використання.

					МРП.171.081.001	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум. докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Метою даної магістерської дисертації було розроблення біосенсора на поверхневому плазмовому резонансі. Біосенсор призначений для вимірювання показника заломлення діелектричного середовища, яке безпосередньо прилягає до металевій плівки, нанесеної на поверхню скляної призми. У зв'язку з тим, що джерелом світла у даному датчику є лазерний діод з довжиною хвилі випромінювання 650 нм, то діапазон вимірюваних значень показника заломлення лежить у межах від 1 до 1,83.

Даний біосенсор можна використовувати в лабораторних умовах для вимірювання концентрації різних речовин та контролю дуже малих кількостей хімічних та біологічних речовин.

Особливістю розробленої конструкції є можливість виводу вимірювального сигналу на комп'ютер для подальшої його оброблення та класифікації. Це досягнуто використанням вимірювального модуля, який підсилює електричний сигнал фотодіода, одночасно приглушуючи наведені шуми, а також перетворює сигнал в цифрову форму (через АЦП) і подає на СОМ-порт комп'ютера.

Перевагою розробленого біосенсора є те, що за його допомогою можна відслідковувати перебіг різних процесів в діелектричних середовищах через вимірювання змін в їх показнику заломлення. Для цього призму, яка має на одній грані шар золота, можна оснастити спеціальною кюветою, в якій протікатимуть досліджувані біохімічні процеси.

					МРП.171.081.001	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум. докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Астапенко В. А. Наноплазмоника и метаматериалы: учеб. пособие / – М. : МФТИ, 2011. – 179 с.
2. Климов В. В. Наноплазмоника / М. : Физматлит, 2009. – 480 с.
3. Методичні вказівки до виконання економіко-організаційного розділу випускних робіт бакалаврів і дипломних робіт спеціалістів студентами інституту прикладного системного аналізу / В.П. Пашін, В.В. Романов, Н.В. Єгорова. – К.: НТУУ “КПІ”, 2011. – 112 с.
4. Основи охорони праці: підручник для вузів / К. Н. Ткачук, М.О. Халімовський, В.В. Зацарний та інші. – К. : Основа, 2003. – 471 с.
5. Майер С. А. Плазмоника: теория и приложения : монография / Москва–Ижевск : НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2011. – 277 с.
6. Мартынов В. Н. Полупроводниковая оптоэлектроника: учеб. пособие / М. : МИСИС, 1999. – 399 с.
7. Homola J. Springer Series on Chemical Sensors and Biosensors / Berlin– Heidelberg : Springer, 2006. – 252 p.
8. Raether H. Surface Plasmons on Smooth and Round Surfaces and on Gratings / Berlin : Springer. 1988. – 184 p.
9. Homola J. Surface Plasmon Resonance Sensors for Detection of Chemical and Biological Species / Chem. Rev. – 2008, vol. 108. – P. 462–493.
10. Handbook of Surface Plasmon Resonance / R. B. M. Schasfoort, A. J. Tudos. Cambridge. 2008. – 426 p.

[illegible]

ДОДАТОК І. ДІЕЛЕКТРИЧНА ФУНКЦІЯ ЗОЛОТА

В приладі, який розробляється, поверхневі плазмонні коливання збуджуються на межі поділу між шаром золота та діелектриком, який є середовищем, характеристики якого вимірюються. У зв'язку з цим необхідно мати функцію діелектричної проникності для золота. Керуючись таблицями з [1] розрахуємо діелектричну функцію золота в області електромагнітного випромінювання 600 – 700 нм.

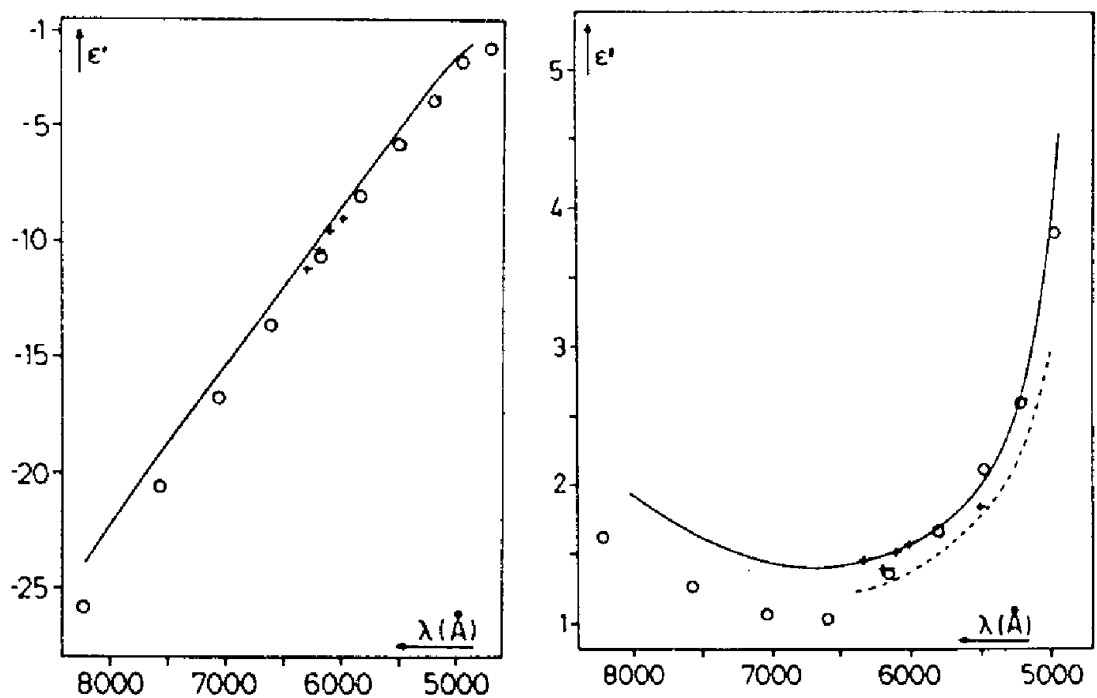


Рис. 1. Дійсна частина $Re[\epsilon']$ для золотої плівки та Уявна частина $Im[\epsilon'']$ для золотої плівки

Table A.2. Dielectric function of gold (see also caption to Table A.1)

$\lambda[\text{\AA}]$	Real part			Imaginary part		
	PM	JC	DT	PM	JC	DT
8200	-23.8	-25.7		2.19	1.62	
8100	-23.1	-24.9		2.08	1.67	
8000	-22.3	-24.0		1.99	1.62	
7900	-21.5	-23.3		1.90	1.46	
7800	-20.7	-22.5		1.82	1.40	
7700	-20.0	-21.7		1.74	1.34	
7600	-19.3	-20.9		1.67	1.29	
7500	-18.6	-20.2		1.62	1.24	
7400	-18.0	-19.4		1.56	1.19	
7300	-17.4	-18.6		1.52	1.15	
7200	-16.7	-17.9		1.48	1.11	
7100	-16.1	-17.2		1.45	1.08	
7000	-15.4	-16.6		1.43	1.05	
6900	-14.7	-15.9		1.42	1.04	
6800	-14.1	-15.2		1.41	1.03	
6700	-13.4	-14.4		1.40	1.02	
6600	-12.7	-13.7	-15.2	1.41	1.04	1.29
6500	-12.1	-13.1	-14.3	1.42	1.08	1.29
6400	-11.4	-12.4	-13.4	1.45	1.14	1.32
6300	-10.8	-11.6	-12.8	1.47	1.20	1.36
6200	-10.1	-11.0	-12.0	1.50	1.27	1.39
6100	-9.5	-10.2	-11.2	1.54	1.35	1.41
6000	-8.9	-9.6	-10.2	1.59	1.45	1.47
5900	-8.2	-8.8	-9.6	1.65	1.55	1.55
5800	-7.5	-8.2	-8.8	1.72	1.67	1.67
5700	-6.8	-7.4	-8.1	1.80	1.80	1.72
5600	-6.1	-6.7	-7.3	1.88	1.94	1.80
5500	-5.5	-6.0	-6.5	1.98	2.09	1.91
5499	-4.7	-5.3	-5.7	2.20	2.28	2.09
5300	-3.8	-4.6	-4.8	2.44	2.49	2.25
5200	-3.2	-3.9	-4.1	2.80	2.73	2.52
5100	-2.5	-3.2	-3.2	3.26	3.12	2.93
5000	-2.0	-2.6	-2.4	4.12	3.56	3.24
4900	-1.6	-2.2			4.02	